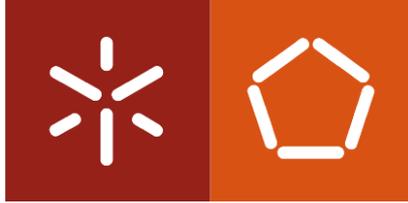




Clara Sofia Gonçalves Marinho

**Estudo da Resistência Térmica em  
Componentes Metálicos Fabricados  
por Manufatura Aditiva e Usados em  
Moldações Metálicas para Fundição**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Clara Sofia Gonçalves Marinho

**Estudo da Resistência Térmica em  
Componentes Metálicos Fabricados por  
Manufatura Aditiva e Usados em  
Moldações Metálicas para Fundição**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Área de Especialização em Manufatura Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## AGRADECIMENTOS

Com a apresentação deste documento, que simboliza o fim de uma etapa da minha vida, quero agradecer à minha família que sempre me apoiou e deu os melhores conselhos para que a chegada até aqui fosse possível.

Agradeço a todos os professores pelos ensinamentos e orientações que me transmitiram durante o meu percurso académico, pois sem eles não teria aqui chegado. Agradeço especialmente ao Professor Hélder Puga, por orientar a minha dissertação e pelos conselhos que me providenciou. Não posso deixar de agradecer também aos alunos de doutoramento, Inês Gomes, Diogo Lopes e José Grilo do Laboratório de Fundição.

Por fim, agradecer aos amigos, que fizeram com que esta etapa fosse mais divertida e que certamente não será esquecida.

---

Este trabalho é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) do Programa Portugal 2020 [Projeto nº 40271, de acrónimo “PRIDOP”; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-040271].

This work is co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) through the Operational Competitiveness and Internationalization Programme (COMPETE 2020) of the Portugal 2020 Program [Project No. 40271, "PRIDOP"; Funding Reference: POCI-01-0247-FEDER-040271].

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## **RESUMO**

A realização deste trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma moldação capaz de promover o arrefecimento dirigido de um metal líquido quando vazado numa qualquer cavidade moldante em moldação metálica. Para tal recorrer-se-á a canais de arrefecimento conformados produzidos pela tecnologia de Manufatura Aditiva (MA). Este objetivo vem na sequência de diversos defeitos que são gerados nos processos de fundição atuais. Com a aplicação de um arrefecimento localizado gerado pela existência de canais conformados, haverá uma melhoria significativa nas peças produzidas.

Este trabalho consistiu em 3 fases distintas. Inicialmente, fez-se um trabalho de pesquisa que passou pelo estudo das tecnologias de fundição por gravidade, fundição injetada e também de tecnologias de MA. Assim, foi possível compreender ao pormenor como funciona cada uma destas tecnologias de fundição, bem como a versatilidade que se pode obter pela aplicação da MA neste tipo de fundição. Quanto à MA fez-se um estudo prévio sobre as tecnologias existentes e quais as mais favoráveis para aplicar em moldações permanentes.

Tendo conhecimento de todos os conceitos teóricos importantes para a realização deste trabalho passou-se para uma segunda fase onde se iniciou a conceção da moldação com a MA. Tendo a ideia do que se pretendia desenvolver, foram propostas 4 soluções que foram analisadas tendo em conta diversos fatores, entre eles os materiais da moldação e de MA. Construiu-se um modelo a utilizar na cavidade moldante, bem como a respetiva moldação. Utilizou-se um protótipo de coquilhadora concebido previamente pelos responsáveis do projeto à qual foram feitas algumas alterações.

Por fim, foram feitos estudos experimentais e numéricos que permitem caracterizar a transferência de calor entre a cavidade moldante e os canais. Foi também validado numericamente o processo de fundição com e sem canais de arrefecimento, compreendendo assim a sua influência na transferência de calor.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Arrefecimento Dirigido, Canais Conformados, Fundição injetada, Fundição por Gravidade, Manufatura Aditiva

## **ABSTRACT**

The work's purpose is to develop a mold capable of promoting directed cooling of a melt when poured into any molding cavity in metal molding. For this, shaped cooling channels produced by Additive Manufacturing (AM) technology will be used. Several defects are generated in current casting processes, appearing the objective of this work. There will be a significant improvement in the parts produced due to the existence of conformal cooling channels that cools down specific and critical areas.

This work consisted in 3 distinct phases. Initially, a research work was carried out including the study of gravity casting, die-casting and AM technologies. Thus, it was possible to understand in detail how each of these foundry technologies works, knowing what can be expected from each one and the versatility obtained by the application of AM in this type of foundry. As for AM, a previous study on the existing technologies and which are the most favourable to apply in permanent mouldings was carried out.

Having the knowledge from the important theoretical concepts, we moved on to a second phase where the design of the moulding with the AM began. Based on one concept of what was intended to be developed, four solutions were proposed considering several factors, among them, the casting and AM materials. A model was constructed to be used in the mold cavity, as well as the respective mold. A prototype of a chiller was used, previously conceived by those responsible for the project, to which some changes were made.

Finally, experimental and numerical studies were carried out to characterize the heat transfer between the moulding cavity and the channels. The casting process with and without cooling channels were also numerically validated, understanding their influence on heat transfer.

## **KEYWORDS**

Directed Cooling, Conformed Channels, High Pressure Diecasting, Gravity Casting, Additive Manufacturing

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	v
Abstract .....	vi
Índice .....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Apresentação do Problema .....	1
1.2 Motivação.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	5
2. Estado da Arte.....	7
2.1 Fundição Injetada/Gravidade – Conceitos .....	7
2.1.1 Fundição por Gravidade em Moldação Metálica.....	8
2.1.2 Fundição Injetada.....	14
2.2 Sistemas de fabrico de canais de arrefecimento conformados .....	20
2.2.1 Tipos de Impressão 3D Existentes e as suas Especificações .....	21
2.2.2 Canais Conformados .....	27
3. Conceção da moldação para vazamento de metal líquido e otimização da coquilhadora	32
3.1 Definição dos objetivos do trabalho.....	32
3.2 Desenvolvimento da moldação .....	34
3.2.1 Escolha de uma solução para aplicação do inserto de MA.....	34
3.3 Projeto da moldação e da coquilhadora .....	40
3.3.1 Análise do modelo proposto .....	41

3.3.2	Moldação para produção da peça sem uso de MA.....	43
3.3.3	Coquilhadora .....	45
3.3.4	Moldação com parte em MA .....	46
4.	Validação preliminar do conceito .....	51
4.1	Estudo Experimental da Interface entre a Moldação e o Inseto de MA .....	51
4.1.1	Cálculo da rugosidade das superfícies na interface .....	52
4.1.2	Ensaio Experimentais de Transferência de Calor .....	55
4.1.3	Cálculo da RTC – Resistência Térmica de Contacto .....	58
4.2	Estudo Numérico da Interface entre a Moldação e o Inseto de MA .....	61
4.2.1	Simulação da transferência de calor para a solução 3.....	61
4.2.2	Simulação da Transferência de Calor da Solução 4 .....	64
4.3	Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da interface .....	64
4.3.1	Resultado da transferência de calor na solução 3 .....	64
4.3.2	Estudo da transferência de calor na solução 4 .....	68
4.4	Estudo numérico do vazamento em moldação com e sem arrefecimento .....	71
4.4.1	Validação Numérico da Moldação sem Arrefecimento por MA.....	72
4.4.2	Validação Numérica da moldação sem arrefecimento por MA, mas com presença de um inseto em MA de aço Maraging .....	73
4.4.3	Validação Numérica da Moldação com Arrefecimento por MA.....	74
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	76
5.1	Conclusões.....	76
5.2	Trabalhos Futuros.....	77
	Referências Bibliográficas .....	78
	Anexo A – Equipamentos da marca GE e respectivas especificações .....	81
	Anexo B - Materiais que podem ser usados na MA e as suas características.....	82
	Anexo C – Ficha técnica do material LaserForm 316L (A)[29] .....	83
	Anexo D – Ficha técnica do material Maraging[30] .....	85
	Anexo E - Desenhos Técnicos da Moldação .....	87
	Anexo F – Modelações dos conectores entre o Inseto de MA e as Tubagens.....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de (a) canais lineares e (b) canais conformados em moldes de injeção plástica [4].	3
Figura 2.2 - Processo de fundição por gravidade. 1-Ferramentas para processo de fundição por gravidade.	9
Figura 2.3 - Tipos de moldação. (a) Moldação Articulada. (b) Moldação translacional [9].	11
Figura 2.4 - Coquilhadora para vazamentos inclinados [1].	12
Figura 2.5 - Exemplo de vazamento inclinado [9].	13
Figura 2.6 - Vista de cima de uma mesa giratória com 12 moldações [10].	14
Figura 2.7 - Processo de fundição injetada. 1- Representação esquemática do sistema coquilhadora e moldação com câmara fria. 2- Fecho da moldação. 3- Vazamento do metal líquido no cilindro hidráulico com recurso a um cadinho. 4-Injeção do metal na cavidade moldante. 5- Circulação de água nos canais de arrefecimento. 6- Solidificação do metal. 7- Abertura da moldação. 8- Extração da peça com recurso aos extratores. 9- Obtenção da peça fundida [11].	15
Figura 2.8 - Variação da pressão e da velocidade de injeção [13].	17
Figura 2.9 - Variação da pressão e da velocidade de injeção [15].	22
Figura 2.10 - Peça produzida pela tecnologia <i>Power Bed Fusion</i> [17].	23
Figura 2.11 - Sistema DED de alimentação: (a) pó; (b) arame [18].	25
Figura 2.12 - Peça produzida pela tecnologia DED [18].	25
Figura 2.13 - Esboço da transferência de calor em (a) canais mais distantes da cavidade moldante e em (b) canais mais próximos da cavidade moldante.	27
Figura 3.14 - Árvore de Objetivos.	33
Figura 3.15 - Variação da rugosidade numa superfície até 10 micrómetros [25].	39
Figura 3.16 - Componentes da cavidade da moldação.	41
Figura 3.17 - Cavidade moldante.	43
Figura 3.18 - Vista isométrica da modelação da coquilhadora e alguns pormenores importantes.	45
Figura 3.19 - Cavidade para incluir um inserto de MA na moldação.	47
Figura 3.20 - Faces externas e internas à moldação, do inserto.	48

Figura 3.21 - (a) Entrada e saída do canal de arrefecimento pela face externa no inserto; (b) Proposta de canais de arrefecimento no interior do inserto. ....	49
Figura 3.22 - Modo de utilização dos conectores escolhidos.....	50
Figura 3.23 - Esboço de uma montagem preliminar dos conectores à moldação. ....	50
Figura 4.24 - Picos e vales em interfaces [26]. ....	52
Figura 4.25 - Direções das trajetórias utilizadas no teste de rugosidade. ....	53
Figura 4.26 - Distribuição da temperatura ao longo de duas superfícies em contacto.....	55
Figura 4.27 - Posicionamento dos termopares e dimensão dos provetes de aço. ....	55
Figura 4.28 - Equipamento de transferência de calor. O poliestireno serve de isolador térmico entre as amostras e o meio ambiente, garantindo que as temperaturas obtidas não sejam influenciadas por esse fator. ....	56
Figura 4.29 - Fluxo de calor do sistema.....	57
Figura 4.30 - Tabela com as propriedades do ar a 20 °C e 101 KPa.....	59
Figura 4.31 - Posicionamento dos provetes na simulação.....	61
Figura 4.32 – Elementos tetraédricos na malha. ....	63
Figura 4.33 - Cotas de extração de temperaturas numéricas. ....	63
Figura 4.34 - Gráfico das diferenças de temperatura na interface, segundo as equações de regressão linear obtidas em Excel para a solução 3. ....	65
Figura 4.35 - Curvas de temperatura com o aumento da pressão. ....	67
Figura 4.36 - Transferência de calor na interface entre o aço H13 e o aço Maraging e representação da variação (inexistente) de Temperatura devido à RTC. ....	67
Figura 4.37 - RTC em função da pressão. ....	70
Figura 4.38 - Perfil de temperatura ao longo da interface dos provetes e representação da RTC com uma pressão de 100 Bar em superfícies polidas. ....	70
Figura 4.39 - Localização dos pontos onde são avaliadas as temperaturas do fundido.....	72
Figura 4.40 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade sem arrefecimento.....	73
Figura 4.41 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade sem arrefecimento, mas com a presença de um inserto de aço Maraging. ....	73

Figura 4.42 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade com a presença de um inserto de aço Maraging e arrefecimento.....	74
Figura F.43 - Conectores para inserir no inserto para uma boa circulação do fluido refrigerante. (a) macho que se encontra aparafusado no inserto; (b) fêmea que se encontra anexada às tubagens de refrigeração. ....	88

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química da liga AlSi7Mg.....	9
Tabela 2.2 - Propriedades da liga AlSi7Mg.....	9
Tabela 2.3 - Composição química da liga AlSi9Cu3Fe.....	18
Tabela 2.4 - Propriedades da liga AlSi9Cu3Fe.....	19
Tabela 2.5 - Tecnologias de impressão 3D e respectivas variantes.....	21
Tabela 2.6 - Detalhes operatórios dos equipamentos da tecnologia SLM.....	24
Tabela 2.7 - Equipamentos OPTOMECH [19] e Trumpf [20]. ....	26
Tabela 3.8 - Soluções de implementação da MA em moldações de fundição injetada. ....	35
Tabela 3.9 - Comparação de soluções.....	36
Tabela 3.10 - Possíveis materiais que contemplam moldações de fundição injetada [24]. ....	37
Tabela 3.11 - Comprimento dos extratores.....	45
Tabela 3.12 - Lista de peças da coquilhadora.....	46
Tabela 4.13 - Ra dos provetes polidos.....	54
Tabela 4.14 - Ra dos provetes sem polimento.....	54
Tabela 4.15 - Equações simplificadas para o ar entra -20 °C e 250 °C.....	60
Tabela 4.16 - Valores Experimentais obtidos de h e da RTC de ambas as soluções.....	66
Tabela 4.17 - Resultados experimentais de h e de RTC para a solução 4.....	68
Tabela 4.18 - Resultados numéricos de h, RTC e respetivo erro com a rugosidade polida e rugosidade real.....	69
Tabela A.19- Características dos equipamentos da marca Aditivo GE[27].....	81
Tabela B.20- Características dos materiais que a MA pode usar[28]. ....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
HPDC	<i>High Pressure Diecasting</i>
LDW	<i>Laser Deposition Welding</i>
MA	Manufatura Aditiva
PBF	<i>Power Bed Fusion</i>
RTC	Resistência Térmica de Contacto
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

P – Pressão	$\mu$ - Viscosidade Dinâmica
V – Volume	K – Condutividade Térmica
T – Temperatura	$E_{relativo}$ – Erro Relativo
Q – Calor	
Cp - Calor Específico	
m – Massa	
h - Coeficiente Convectivo	
A – Área	
RTC - Resistência Térmica de Contacto	
Ra - Número de Rayleigh	
Pr - Número de Prantl	
Gr – Número de Grashoff	

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo é apresentado o problema que levou ao tema desta dissertação, isto é, os defeitos que são gerados durante o processo de fundição em moldações metálicas. Estes defeitos são criados pela existência de canais de arrefecimento que são lineares e que não permitem um arrefecimento dirigido da peça a produzir. Para além disso, é apresentada a motivação para a resolução do problema proposto, que sendo algo inovador é ainda pouco conhecido na indústria da fundição, principalmente no processo de moldações permanentes.

Finalmente, é apresentada a estrutura da dissertação.

### 1.1 Apresentação do Problema

Uma das características do processo de fundição injetada (HPDC) consiste na obtenção de peças com boa qualidade superficial devido ao elevado acabamento da moldação, podendo-se obter valores de rugosidade na ordem dos  $0,4 - 3,2 \mu\text{m}$ , na cavidade. Outra característica deste processo é o facto de apresentar uma boa precisão dimensional, devido as condições de enchimento. Para além disso, as tolerâncias dimensionais são mais reduzidas do que noutros processos, na ordem dos  $0.02 \text{ mm}$  [2]. Isto significa que as peças produzidas por este processo não podem apresentar variações dimensionais significativas, sendo por isso importante compreender o que poderá estar na sua origem.

Um dos defeitos gerados durante o processo de fundição, deve-se ao processo de solidificação do metal dentro da cavidade moldante, que acumulando ar no seu interior durante o processo de enchimento da cavidade moldante, leva à existência de microporosidades nas peças produzidas. Estas microporosidades, para além de já serem um problema para a peça, tendem a aumentar se a peça for tratada termicamente (T4). Este fenómeno de expansão da porosidade, acontece devido à variação da pressão interna dos gases com a alteração da temperatura. Como o ar é um gás perfeito é possível usar a equação dos gases perfeitos para compreender este fenómeno. Nesta equação,  $P$  representa a pressão interna,  $V$  o volume de gás, e  $T$  a temperatura absoluta.

Assim, na fase de enchimento, os gases encontram-se misturados com o metal líquido a uma pressão  $P_1$ , com um volume  $V_1$  e a uma temperatura  $T_1$ . Após esta fase, ocorre a fase

de compactação do metal líquido, durante a qual aumenta a pressão de  $P_1$  para  $P_2$ . Este aumento de pressão leva à diminuição do volume, que passa de  $V_1$  para  $V_2$ . Com o decorrer da solidificação do metal sob pressão, o volume do gás mantém-se constante. Contudo, há um decréscimo da pressão que passa de  $P_2$  a  $P_2'$ , até que se atinja o equilíbrio à temperatura ambiente.

Quando se submete uma peça produzida por fundição injetada a tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento natural, ou seja, a um aumento de temperatura, este terá de ser compensado por um aumento de pressão, para  $P_3$ , uma vez que o volume se mantém contante. Assim, se a força exercida pela pressão interna for superior à tensão limite de elasticidade do metal, o volume dos poros acaba por aumentar [3].

Por essa razão, as peças obtidas por fundição injetada implicam alguns constrangimentos no que diz respeito ao tratamento térmico (T4).

A resolução deste problema passa, atualmente, pelo uso de equipamentos que permitem realizar o processo de fundição injetada com auxílio de vácuo. Este método consiste em retirar o ar existente na cavidade moldante e não permitir a entrada de ar do exterior. Desta forma, reduz-se a geração de microporosidades nas peças, permitindo que estas possam sofrer tratamentos térmicos. De facto, mesmo que se verifique alguma porosidade, esta será inferior àquela que se verifica para uma solução de enchimento sem recurso a vácuo.

Outro tipo de fundição em moldação metálica que tem relevância para este trabalho é a fundição por gravidade. O arrefecimento na cavidade moldante far-se-á primeiro pelas zonas mais finas (na ordem dos 0.8 mm em ligas de alumínio) e depois pelas zonas mais espessas [2]. Esta tecnologia também tem a si associados alguns defeitos, sendo que neste caso o mais frequente é a contração volumétrica. Esta situação acaba por gerar problemas relacionados com gradientes de temperatura, que normalmente originam distorções geométricas e variações dimensionais que não seriam espectáveis. Para além disso, durante o arrefecimento, também são geradas tensões (devido à contração volumétrica) que vão condicionar a qualidade geométrica e dimensional dos fundidos.

Assim, durante o processo de fundição o arrefecimento é controlado na medida do possível através de canais de arrefecimento com geometria linear. Na figura 1.1 (a) é possível observar uma representação de canais lineares (a laranja), produzidos com tecnologias de maquinagem e que se aplica em peças de fundição injetada, neste caso de plástico. Neles

é feito fluir um líquido que pode aquecer/arrefecer a moldação sempre que necessário, de modo a manter a temperatura o mais uniforme possível quer nas zonas mais espessas como nas mais finas. Isto acaba por gerar o arrefecimento homogeneizado da moldação, evitando os problemas de distorção geométrica e de variações dimensionais.

Embora esta técnica já permita a redução substancial de defeitos de distorção geométrica, será possível reduzir ainda mais a existência destas imperfeições se, ao invés de apresentarem geometrias lineares, os canais circundarem com mais precisão a forma da cavidade e das partes onde se quer controlar mais eficazmente o arrefecimento/aquecimento. A utilização destes canais, canais conformados, levarão a um arrefecimento muito mais dirigido e mais bem controlado. A existência de defeitos irá diminuir substancialmente, e a produção de peças complexas será menos evitada, pois praticamente todas acabariam por poder ser produzidas. Em tecnologias de fundição injetada de plástico atualmente já são usados canais conformados para o arrefecimento da cavidade moldante. Estes canais podem ver-se na figura 1.1 (b). Contudo, estes não podem ser obtidos por tecnologias de maquinaria, sendo, portanto, necessário repensar o seu processo de fabrico.

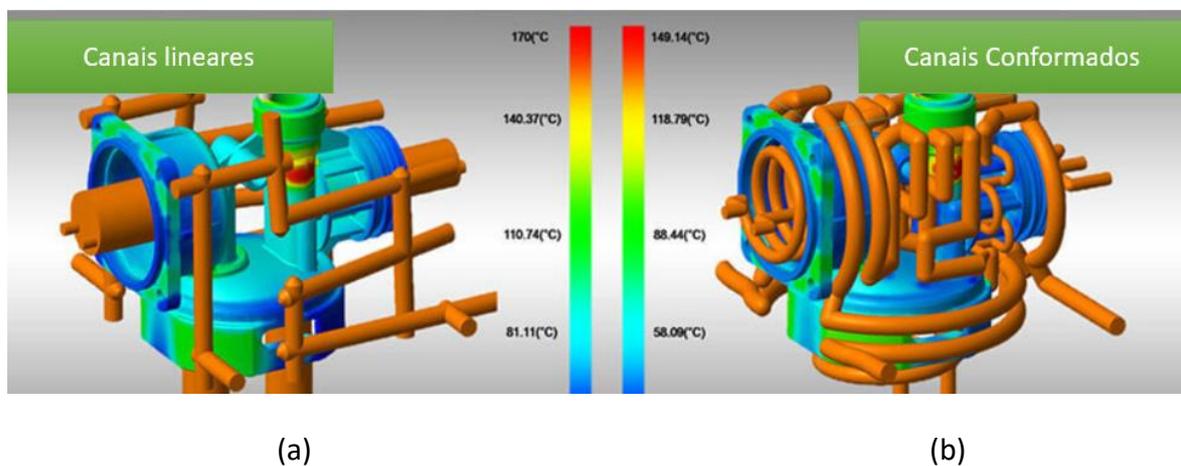


Figura 1.1 – Exemplo de (a) canais lineares e (b) canais conformados em moldes de injeção plástica [4].

Atualmente, já existem tecnologias de impressão 3D de metais que permitem a construção camada a camada de objetos, permitindo a construção de interiores ocos e com diferentes geometrias (como por exemplo estruturas celulares), e, portanto, de canais não lineares no seu interior. Embora estas tecnologias de Manufatura Aditiva (MA) ainda estejam numa

fase de desenvolvimento muito primitiva, e consecutivamente sejam tecnologias de produção demorada, os canais não lineares podem ser obtidos através destas tecnologias.

## **1.2 Motivação**

Um dos grandes problemas presentes na atualidade no processo de fundição em moldação metálica por gravidade é a dificuldade em projetar o arrefecimento unidirecional, sem com isso alterar a geometria do fundido. Assim, torna-se relevante estudar formas de melhorar o arrefecimento do conjunto moldação/fundido durante o momento de enchimento e solidificação do metal líquido vazado na cavidade moldante.

O correto dimensionamento dos canais de arrefecimento permitirá a obtenção de fundidos com boa sanidade microestrutural, propriedades mecânicas melhoradas e qualidade dimensional. Sendo este tema – fundição de peças em moldações com canais de arrefecimento conformados – alvo de estudo num projeto existente no Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia, da Universidade do Minho, torna-se motivo extra para um aluno de Engenharia Mecânica participar, aprender e desenvolver conhecimentos na matéria em questão.

## **1.3 Objetivos**

Tendo bem presente as características do processo de fundição em estudo, avaliando corretamente as melhores técnicas de fabrico de canais conformados por MA e considerando sempre as suas especificidades enquanto processo de fabrico, é então possível definir um conjunto de soluções para a aplicação de tais canais conformados em moldações metálicas. De todas as soluções a estudar será importante fazer uma avaliação do ponto de vista económico e de fabrico.

Após obtenção da solução mais adequada para o projeto, essa será avaliada numérica e experimentalmente em termos de transferência de calor. Também será feita a verificação numérica do vazamento e solidificação do metal fundido com e sem a solução escolhida.

Estes estudos consistem na análise das características a que a interface entre os materiais deve estar sujeita, avaliando-se as rugosidades superficiais ideais ao processo de transferência de calor, as pressões, entre outros, de modo a que a resistência térmica de contacto seja otimizada.

Numericamente, estudar-se-á, a transferência de calor gerada pelos novos canais conformados, tendo em conta a resistência térmica de contacto antes calculada entre os materiais. Verificar-se-á, também, o arrefecimento desejado da moldação, devido à existência de canais produzidos por tecnologias de MA.

Como resultado deste trabalho é expectável compreender de que forma poderão ser introduzidos canais de arrefecimento conformados produzidos por MA numa moldação metálica.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

Este documento está dividido em 4 capítulos. Inicialmente é apresentado o estado da arte, onde se explicam os conceitos que têm interesse para este trabalho. Esses conceitos, relacionados com a fundição em moldações metálicas, são os seguintes: fundição por gravidade e fundição injetada. Também são abordados os conceitos necessários a este trabalho sobre a MA de metais. Posto isto, são apresentados os processos de MA e as suas variantes existentes no mercado, sendo identificadas as mais apropriadas para a construção de canais de arrefecimento para moldações metálicas. Finalmente são explicados os requisitos e especificações a que os canais de arrefecimento devem estar sujeitos, referindo também o fluido mais adequado a ser utilizado na refrigeração das moldações metálicas, bem como a influência da rugosidade nos canais e na transferência de calor.

Posto isto, é apresentado o protótipo do equipamento para vazamento do metal líquido pensado e desenvolvido antes do início deste trabalho. Para além disso, são apresentadas as moldações, que foram projetadas (i) sem qualquer tipo de arrefecimento e (ii) com arrefecimento provido de canais conformados produzidos por tecnologias de MA. O recurso a estas duas moldações é necessário para se compreender a diferença entre a falta de arrefecimento forçado e o arrefecimento causado pelo uso de canais de arrefecimento conformado.

Neste ponto, é estabelecida uma árvore de objetivos que ajuda à melhor compreensão do problema e de que forma pode ser atingido o objetivo principal. Estabelecidos os objetivos é iniciado o processo de desenvolvimento da moldação, onde se define qual a melhor solução que se deve adotar para aplicar um arrefecimento com canais conformados através da tecnologia desejada. Posto isto, é iniciado o projeto da moldação e são feitas algumas

alterações aos elementos da coquilhadora pré-desenvolvida, de modo a ser garantido o bom funcionamento do equipamento para vazamento. Finalmente, parte-se para a validação do conceito, fazendo as simulações necessárias e também algumas experiências físicas. Com isto pretende-se perceber como são feitos a transferência de calor e o arrefecimento do fundido. Portanto, é simulada e estudada experimentalmente a interface entre os materiais da moldação, de modo a compreender o perfil de temperaturas que existe em ambas as partes e a influência da RTC na transferência de calor. Calculados os valores da RTC é possível então fazer a simulação da fundição do modelo escolhido verificando as diferenças entre, por um lado, as moldações sem qualquer arrefecimento forçado e, por outro lado, as moldações com arrefecimento provido de canais conformados.

Por fim, são apresentadas algumas conclusões ao trabalho elaborado, assim como a perspectiva de trabalhos futuros, a qual passará pela construção das moldações e vazamento dos fundidos. Todo este projeto culminará com a verificação da microestrutura das peças resultantes, onde será possível concluir a eficiência da solução escolhida e relativa aos canais conformados.

## 2. ESTADO DA ARTE

Ao longo deste capítulo são apresentados os principais conceitos para o bom desenvolvimento do projeto. Estes estão relacionados com os processos de fundição injetada e de fundição por gravidade. Aqui são explicadas as características de ambos, uma vez que o seu entendimento é imprescindível para a realização deste trabalho.

Seguidamente, são apresentados os processos de MA atualmente existentes e as características que devem ser tidas em conta para o projeto e para a construção de moldações metálicas.

São apresentados os requisitos necessários dos canais de arrefecimento, para que estes sejam tidos em consideração aquando da sua produção por MA.

### 2.1 Fundição Injetada/Gravidade – Conceitos

Os processos de fundição em moldações permanentes apresentam um procedimento equivalente em ambos os casos. Inicialmente, na sua forma de lingote, que neste tipo de fundição se caracteriza por serem ligas de alumínio – silício – magnésio, é fundido à temperatura de *liquidus* e depois sobreaquecido a uma temperatura a rondar os 700-720 °C. Quando fundido passa à fase de tratamento líquido onde é feita a desgaseificação e a afinação do banho metálico. Para além disso, outra forma de se diminuir a quantidade de gases dissolvidos no fundido é o borbulhamento do fundido com gases inertes. O uso de azoto para fazer o borbulhamento nas ligas de alumínio ajuda retirar o hidrogénio nele dissolvido. O processo de fusão passa pelo controlo da composição química e pelo conhecimento da exata composição química da matéria-prima numa fase inicial. Posto isto, a afinação da composição química passa pela adição de elementos de liga, em percentagens desejadas, à liga principal. Quando necessário é também feita a modificação do silício eutético por ligas-mãe em função das propriedades mecânicas que se desejam obter.

De seguida, é feito o vazamento do metal líquido tratado. Nesta fase também se deve minimizar a turbulência, uma vez que assim se evita um maior contacto do metal com o ar. A geometria do canal de alimentação também vai ter um papel importante na diminuição da turbulência. Durante o enchimento, para ajudar à desgaseificação, pode-se recorrer ao

uso de vácuo. Outra forma de eliminar elementos no fundido que não são desejados é injetar gases reativos para que se formem compostos de baixa densidade (escória) [5].

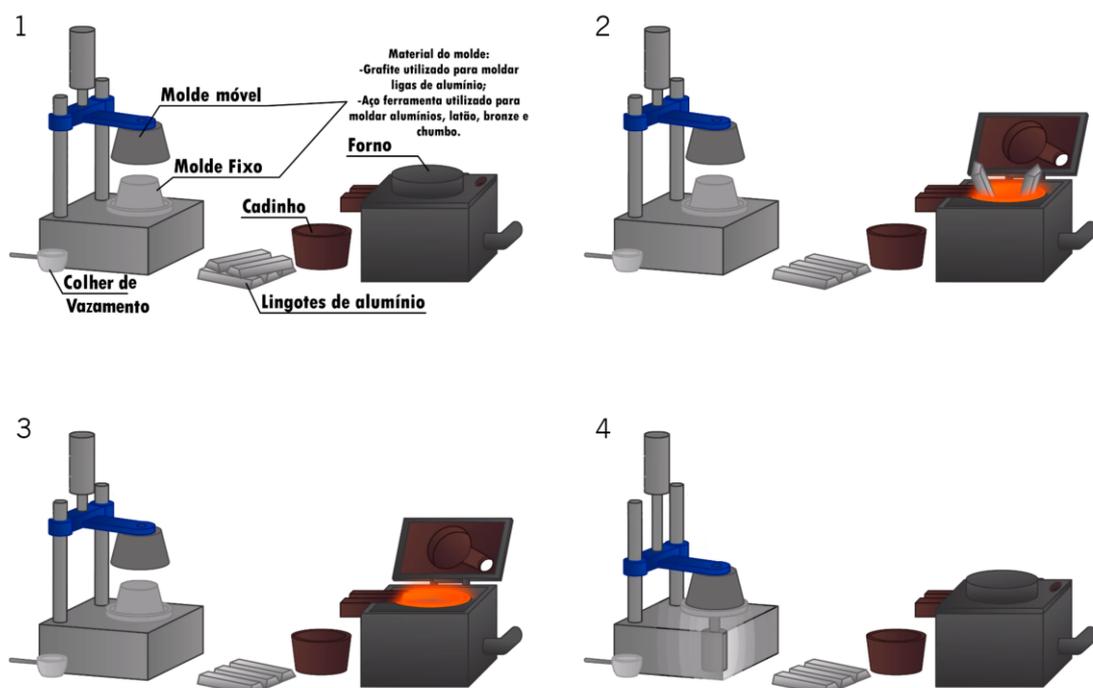
Nos próximos subcapítulos são explicadas as sequências de fundição e os locais onde são realizados os tratamentos do metal líquido em cada um dos processos, uma vez que estes diferem de processo para processo. São também referidos os metais que são utilizados em cada processo, bem como as principais características de ambos.

Também são apresentados os tipos e sistemas de arrefecimento que cada processo tem disponível.

Por fim, são introduzidos novos processos de fabrico, em particular de MA, para os canais a serem produzidos em novas soluções idealizadas.

### 2.1.1 Fundição por Gravidade em Moldação Metálica

Neste processo, é iniciada a fusão dos lingotes no forno. Estando o metal pronto, este passa pelo devido tratamento, ainda no forno. Quando pronto é coletado e vazado na moldação, que tem um canal de descida projetado para fazer o metal fluir em função da gravidade, à pressão atmosférica. Na figura 2.2 é apresentado todo este processo, de forma esquematizada.



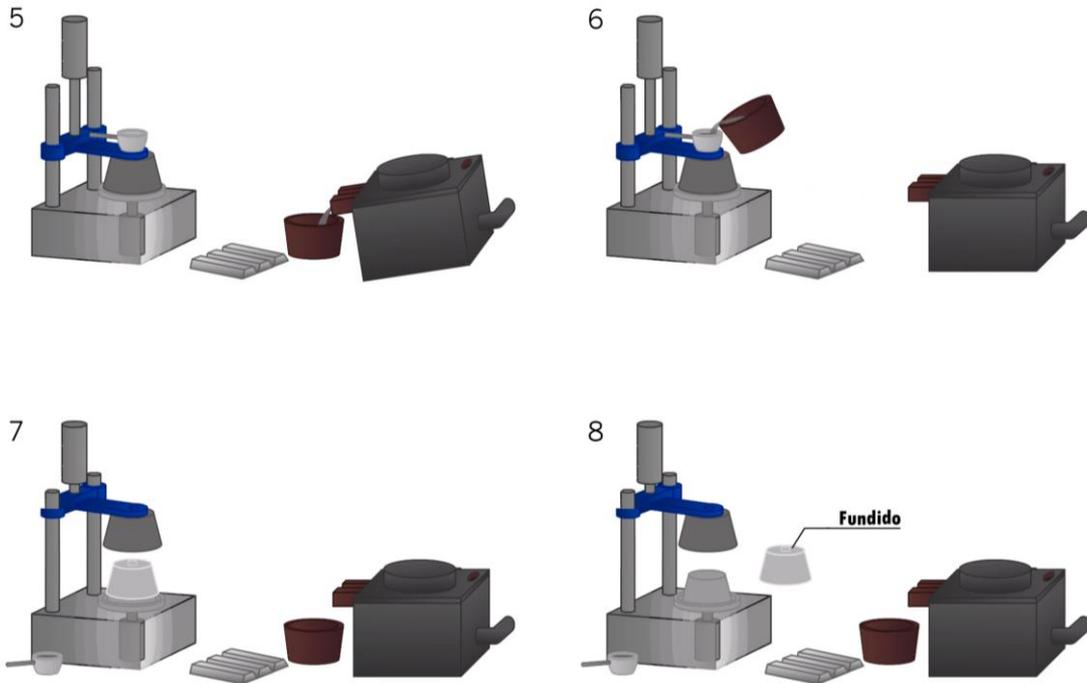


Figura 2.2 - Processo de fundição por gravidade. 1-Ferramentas para processo de fundição por gravidade. 2-Aquecimento do forno e introdução dos lingotes no seu interior. 3- Fusão dos lingotes e tratamento do metal líquido. 4- Fecho da moldação móvel. 5- Vazamento do metal líquido do forno no cadinho. 6- Vazamento do metal líquido do cadinho no canal de vazamento da coquilha. 7- Abertura da coquilha. 8- Obtenção da peça final [6].

Neste tipo de processo de fundição são normalmente vazadas ligas do tipo AlSi7Mg. A composição química deste material está explícita na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química da liga AlSi7Mg.

Elementos	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Ti	Si	Zn	Outros
% Wt	91,1-93,3	≤0,20	≤0,20	0,25-0,45	≤0,10	≤0,20	6,5-7,5	≤0,10	≤0,15

As suas propriedades estão explícitas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades da liga AlSi7Mg.

$P$ (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (HB)	$\nu$ (coeficiente de poisson)	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg.K)	Temperatura de fusão (°C)	Temperatura de fundição (°C)
2,67	70 – 100	0,33	151	963	677-816	677-788

Existem alguns parâmetros a ter em conta durante o processo de fundição por gravidade, entre eles, a temperatura da moldação, o pré-aquecimento da moldação que é feito com chamas através de um maçarico, e a temperatura de vazamento do banho metálico. Relativamente à temperatura da moldação, é importante saber que a mais adequada é aquela que vai produzir uma peça fundida em boas condições e com qualidade. Uma temperatura de moldação muito baixa faz com que a alimentação da cavidade com metal fundido seja inibida, o que geralmente resulta numa contração prematura, em possíveis fissuras a quente e uma aderência do fundido às paredes da moldação e aos machos.

Por fim, a temperatura de vazamento de um fundido está geralmente compreendida numa gama de temperaturas muito apertada, dependendo do tipo de liga. Assim, se a temperatura de vazamento for inferior à ideal, a cavidade moldante não irá encher e os elementos de liga adicionados quando utilizados não serão ligados. Por isso, temperaturas de vazamento inferiores à ideal irá trazer consequências no número de paragens de ciclo (que serão superiores), e fissuras a quente. Estas fissuras poderão ser prevenidas com um pequeno aumento da temperatura.

Pelo contrário, o uso de uma temperatura de vazamento superior à ideal, pode causar contrações nas peças fundidas e também empenar a moldação, levando à perda da tolerância dimensional da peça fundida. Para além disso, o uso de uma temperatura muito elevada, pode levar à variação da composição química do metal, uma vez que alguns dos seus elementos são voláteis a altas temperaturas. Temperaturas altas de vazamento, provocam o aumento do tempo de solidificação, aumentando assim o tempo de produção, e diminuindo a vida útil da moldação.

Para além dos parâmetros de vazamento que são importantes de considerar durante o projeto das moldações e do próprio processo de fundição, é importante também projetar um correto *design* da moldação. Esta é normalmente feita através de técnicas de maquinagem, e em partes que são facilmente montadas e desmontadas, e com fáceis encaixes [7]. As moldações deste tipo de fundição são em aço ou ferro fundido.

Durante o projeto destas moldações é preciso ter em conta a expansão e contração térmica do material da moldação. Para além disso, as paredes da moldação devem ter espessuras o mais próximo possível umas das outras, permitindo minimizar os gradientes térmicos na moldação, o que acaba por aumentar a sua vida útil.

Este processo no geral é adequado para médias e grandes produções. Os fundidos produzidos devem ter paredes com espessuras não muito diferentes entre si. As paredes devem ter um mínimo de 7 mm, de modo que a extração de calor seja um pouco dificultada permitindo que o metal se mantenha fluido o tempo suficiente para encher por completo toda a cavidade. Este processo, não permite a produção de peças complexas. A qualidade dos fundidos é superior à de fundidos em areia e inferior à qualidade de fundidos injetados, e apresenta uma estrutura refinada e com porosidade reduzida. As peças que são produzidas através deste processo apresentam um custo final menor quando produzidas pequenas quantidades, comparativamente à tecnologia de fundição injetada, pois nesta última quanto maior for a produção menor é o preço unitário.

Em ambos os processos, é exequível o uso de insertos e postiços. Por isso é possível efetuar alterações nas moldações relativas a diâmetros de furos sem com isso alterar a moldação, pois apenas é necessário a alteração dos postiços na moldação [7].

As moldações que são usadas para a produção de peças em ligas de alumínio apresentam uma vida útil de no máximo 100000 ciclos e a temperatura de vazamento dessas ligas pode ir de 700 °C a 760 °C [8].

Estas moldações, não apresentam qualquer tipo de arrefecimento forçado.

As moldações para este tipo de fundição podem ser articuladas como representado na figura 2.3 (a), permitindo o correto posicionamento relativo e facilitando o seu fecho manual. Podem ainda ter um fecho e abertura com dispositivo translacional que é operado manualmente, ou no caso representado na figura 2.3 (b) com um conjunto hidráulico que facilita a abertura e o fecho das moldações, fazendo um deslocamento linear [2].

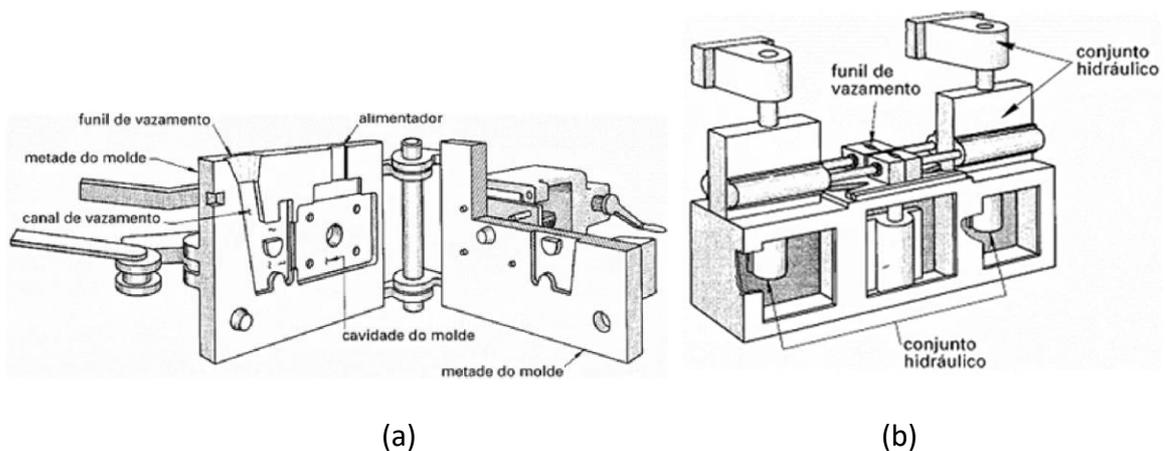


Figura 2.3 - Tipos de moldação. (a) Moldação Articulada. (b) Moldação translacional [9].

Atualmente já são utilizados mecanismos de ar comprimido ou mecanismos hidráulicos permitindo a abertura e o fecho das moldações de forma automática. Também operações como a colocação e extração de machos, bem como a ejeção de peças recorrem atualmente a estes mecanismos. Isto permite que os ciclos de produção sejam reduzidos para um tempo inferior a um minuto.

Por este processo também é possível a obtenção de furos perpendiculares ao plano de apartação, com recurso a machos metálicos, sendo os machos retirados aquando da abertura da moldação. A obtenção de furos complexos exige o uso de machos de materiais cerâmicos como a areia ou o gesso.

Em certas situações, são também usadas coquilhadoras como a da figura 2.4, que permitem um vazamento inclinado nas moldações. Normalmente são usados planos de apartação verticais, contudo muitas peças são mais bem vazadas se os seus planos de apartação forem horizontais, mas o vazamento se der na vertical. E para isso, é necessário o uso deste tipo de coquilhadora. Assim, o vazamento é feito com o plano de apartação na horizontal, e a moldação é posteriormente rodada para permitir que haja saída do ar durante o processo. Esta rotação permite que o plano de apartação fique na vertical, facilitando a ejeção da peça depois de solidificada e da moldação aberta, como se pode ver na figura 2.5.



Figura 2.4 - Coquilhadora para vazamentos inclinados [1].

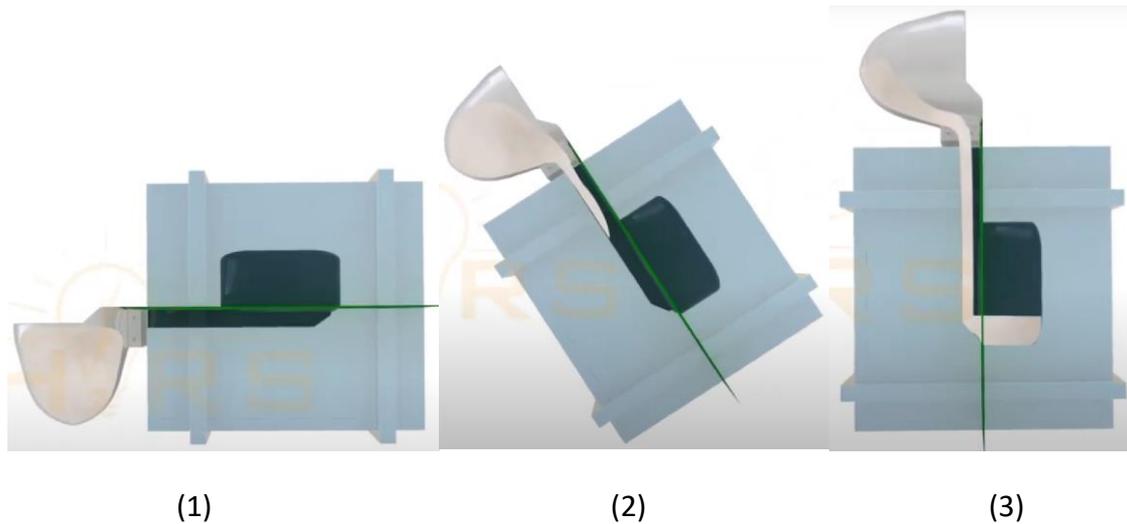


Figura 2.5 - Exemplo de vazamento inclinado [9].

Outro dispositivo também utilizado no processo de fundição por gravidade é a mesa giratória ou o processo “EATON”. Este é composto por mesas que podem ter um conjunto de 12 moldações, minimizando o tempo de produção, pois em vez de vaziar uma peça de cada vez, são feitos vários de uma só vez. À medida que esta mesa vai girando, a velocidade constante, as moldações são automaticamente fechadas, o metal é vazado, passam por um ciclo de arrefecimento, abrem-se e as peças são extraídas. Uma vantagem desta coquilhadora é que permite não só que se façam 12 peças, como todas elas podem ser diferentes, desde que a sua velocidade de rotação permita o arrefecimento necessário e suficiente para a obtenção de peças sãs. Na figura 2.6 apresenta-se um esboço de uma mesa giratória com doze moldações vista de cima [2].

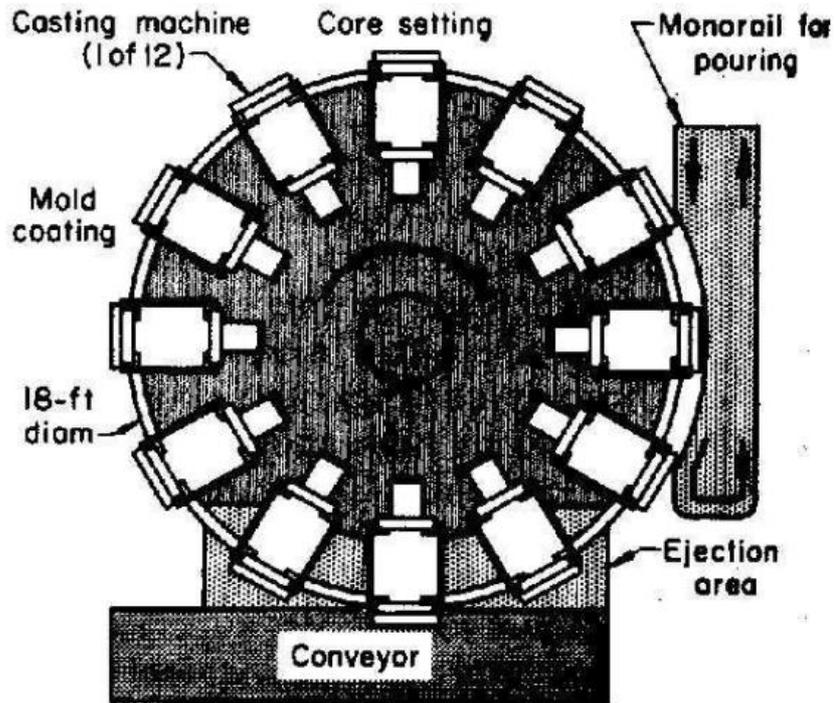


Figura 2.6 - Vista de cima de uma mesa giratória com 12 moldações [10].

### 2.1.2 Fundição Injetada

A grande diferença deste processo de fundição para com o anterior dá-se no local onde é feito o tratamento do metal líquido. Neste caso, já não é feita no alto forno, mas sim num forno de manutenção. Portanto, o metal líquido é transportado do primeiro forno para o forno de manutenção para se proceder ao seu tratamento, onde também nele é feita a dosagem. Quando pronto, o metal líquido é transportado com o cadinho para o interior do pistão e é injetado para o interior da cavidade moldante com recurso a um pistão hidráulico. Na figura 2.7 é possível ver a fase da injeção do metal depois do tratamento do metal líquido ter sido efetuado.

# Fundição sob pressão

**Câmara fria:** o sistema de injeção não fica mergulhado no metal líquido.

Indicado para metais com ponto de fusão alto, como:  
Cobre (1.085 °C), Alumínio (660,3 °C), Magnésio (650 °C).

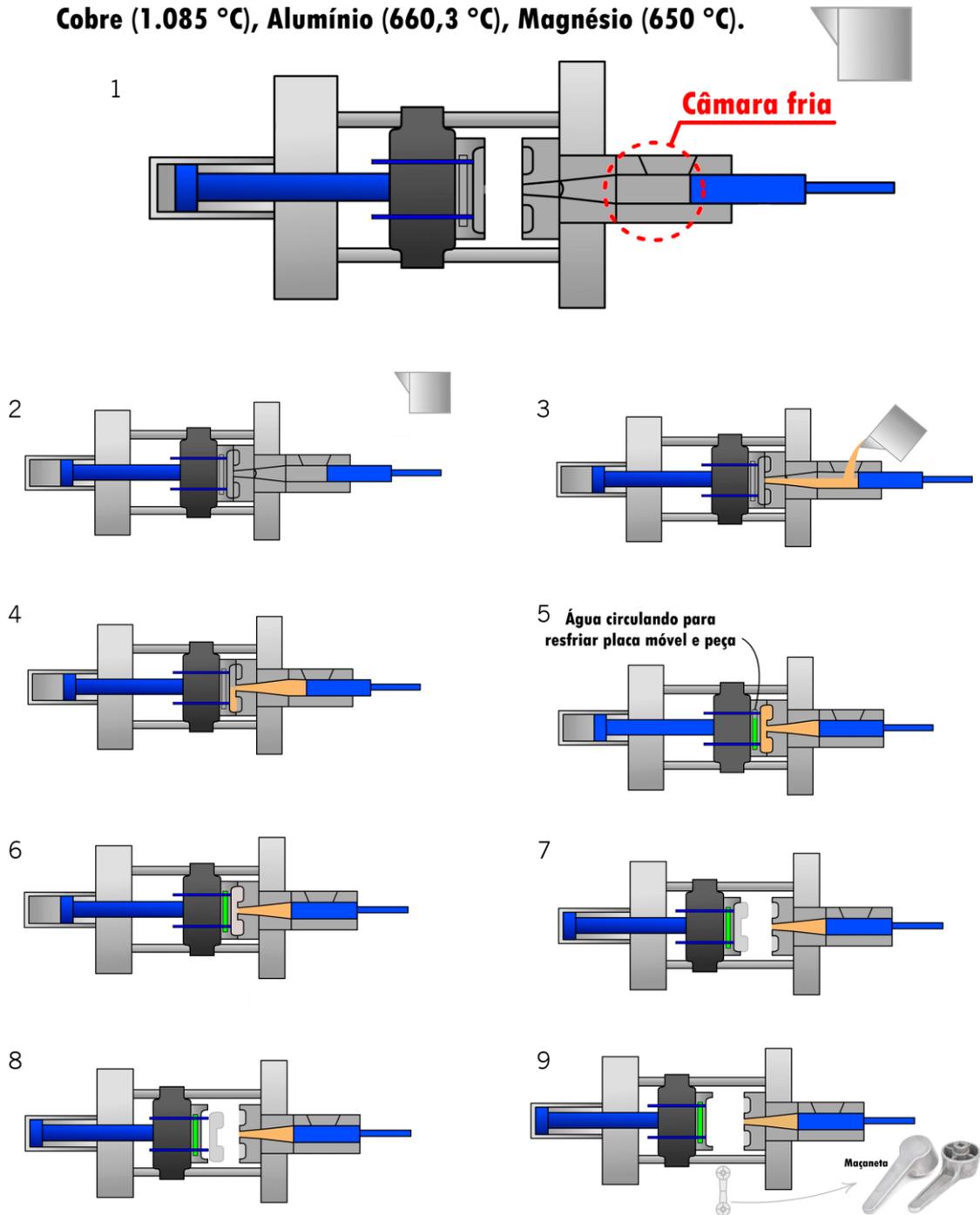


Figura 2.7 - Processo de fundição injetada. 1- Representação esquemática do sistema coquilhadora e moldação com câmara fria. 2- Fechamento da moldação. 3- Vazamento do metal líquido no cilindro hidráulico com recurso a um cadinho. 4- Injeção do metal na cavidade moldante. 5- Circulação de água nos canais de arrefecimento. 6- Solidificação do metal. 7- Abertura da moldação. 8- Extração da peça com recurso aos extratores. 9- Obtenção da peça fundida [11].

Este processo de fundição exige que se tenha em consideração alguns parâmetros como a qualidade e temperatura do banho metálico, os parâmetros de injeção da máquina (pressão e velocidade de injeção), a temperatura de funcionamento das moldações e a lubrificação.

A temperatura do banho encontra-se normalmente entre 670 °C e 690 °C, o que permite que haja menos teor em hidrogénio (a solubilidade do hidrogénio aumenta com a temperatura). Este elemento é responsável pela porosidade. O que acontece caso a temperatura seja muito baixa é que o banho poderá solidificar antes de se finalizar o enchimento. Caso seja muito alta, o metal líquido poderá ser agressivo com o material da camisa de disparo e originar ciclos de fundição longos e choques térmicos maiores, o que acaba por degradar a moldação [2].

Esta injeção faz-se em três fases, inicialmente o pistão começa por se deslocar a baixa velocidade, empurrando o metal líquido. Este movimento é provido por um cilindro hidráulico. A primeira fase tem como objetivo levar o metal líquido até à entrada da moldação o mais rápido possível, de modo que a liga não arrefeça. Para além disso, este fluxo dá-se em regime laminar para evitar a incorporação de ar no metal. Na segunda fase é aumentada a velocidade com o objetivo de encher a cavidade (pode variar entre 30 e 60 m<sup>3</sup>/s dependendo da espessura a vazar). A moldação deve encontrar-se entre uma temperatura de 160 °C e de 260 °C e o enchimento deve ser feito o mais rapidamente possível de modo a que o arrefecimento prematuro da liga seja evitado (os tempos de enchimento variam entre 0,01 e 0,3 segundos). O enchimento deve, contudo, ter uma velocidade lenta o suficiente para que o ar consiga sair pelos orifícios de ventilação sem dificuldade, e também para que não haja desgaste das ferramentas. Numa terceira fase, quando a moldação já se encontra devidamente cheia e a liga já se encontra perto da sua temperatura de solidificação, ao pistão é aplicado um súbito aumento de pressão. É, então, atingida a pressão máxima do processo (que pode variar entre 400 e 900 Bar, existindo equipamentos que podem chegar aos 1000 Bar) para que se dê a compactação da liga. Esta compactação vai provocar no metal a sua solidificação. Depois do metal estar solidificado, é aberta a moldação pela parte móvel. Para se fazer a extração do fundido normalmente recorre-se aos extratores, que avançam com o recuo da moldação móvel [12].

Apresenta-se na figura 2.8 o gráfico de pressão e de velocidade durante todo o processo de injeção de metal.

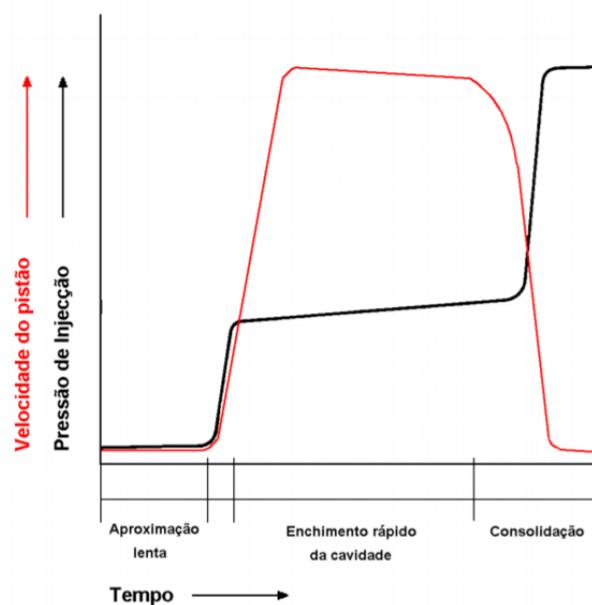


Figura 2.8 - Variação da pressão e da velocidade de injeção [13].

Após a fase de fundição a peça passa por outras fases, como a coleta desses mesmos fundidos por um braço robótico, arrefecimento com recurso a um tanque de água e posteriormente cortadas as peças do restante sistema de enchimento com uma prensa de corte.

Portanto, para que a fundição injetada seja possível é necessário a existência de uma moldação metálica, um forno para manter a liga metálica em fusão, um forno de manutenção para se fazer o tratamento do metal líquido, uma prensa de moldação por injeção, uma serra para corte de gitos e rebarbas, e robôs para assegurar a transferência de peças da prensa da moldação para o posto de corte dos gitos e rebarbas. Outros equipamentos que automatizem o processo de obtenção de peças de fundição injetada devem obedecer a alguns requisitos como permitir e proporcionar os movimentos de abertura e de fecho da moldação. Esses equipamentos devem também ser capazes de garantir o rigor da montagem das moldações e a segurança do processo, devem também conter dispositivos de injeção e de regulação da quantidade adequada de metal líquido a injetar, e não podem ser vulneráveis à liga que está a ser vazada [2]. Em média é possível fazer entre 40 e 200 injeções por hora [12].

Com este processo de fabrico é possível obter peças com no máximo 10 kg, uma espessura de parede mínima de 2 mm em peças grandes e de 1 mm em peças pequenas, furos com

diâmetro mínimo de 2 mm, e ângulos de saída em furos de 0,012<sup>0</sup> no mínimo e de 0,011<sup>0</sup> em faces com altura de 25,4 mm [12].

A temperatura da moldação tem repercussões ao nível do acabamento superficial da peça vazada, da intensidade do choque térmico (que é o principal responsável pela degradação da moldação), e do tempo de ciclo produtivo. O ciclo de injeção não depende só da temperatura da moldação, mas também do lubrificante que se usa, pois tem a importante função de facilitar a remoção do fundido da moldação e ajudar à formação de peças polidas, prevenindo a formação de crostas na cavidade da moldação. Se o lubrificante utilizado não for em quantidade suficiente, o fundido corre o risco de ficar colado à moldação. Para além disso, são normalmente utilizados teores de ferro com percentagens de 1% Wt nas ligas vazadas, com objetivo de evitar que os fundidos não se descolem das moldações. Se este for em excesso pode levar à origem de porosidades na peça. Para além disso, o lubrificante deve poder aderir à moldação e poder operar às temperaturas de funcionamento da moldação, pois isto levará à redução do tempo de ciclo e acabará por poupar quantidades significativas de lubrificante [2].

A moldação deste tipo de fundição é aço do tipo X38 CrMoV5. Neste caso, o aço após maquinado passa por um tratamento térmico de têmpera e dois revenidos, dando assim à moldação uma dureza final de 45 a 55 HRC.

Já neste processo o material que normalmente é fundido é a liga AlSi9Cu3Fe. Contudo, também é possível vazar ligas de zinco e de magnésio.

O material AlSi9Cu3Fe é um aço comumente utilizado para vazamento sob pressão. Na tabela 2.3 é possível analisar a composição química deste material.

Tabela 2.3 - Composição química da liga AlSi9Cu3Fe.

Elementos	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Sn	Zn	Outros
% Wt	80,3-89,5	3,0-4,0	≤1,3	≤0,10	≤0,50	≤0,50	7,5-9,5	≤0,35	≤3,0	≤0,50

As suas propriedades estão explicitas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades da liga AlSi9Cu3Fe.

$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (HB)	$\nu$	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg.K)	Temperatura de fusão (°C)	Temperatura de fundição (°C)
2,76	80	0,33	109	963	649 - 760	635 – 704

Esta liga caracteriza-se por apresentar uma boa estabilidade e precisão dimensional, e uma boa resistência à corrosão.

As peças resultantes deste processo de fundição podem ter forma simples ou complexas, com paredes finas e com um bom aspeto visual, ou seja, com bons acabamentos. As características mecânicas destas peças passam pelo bom desempenho que apresentam face a diversos tipos de solicitações. Estas peças podem facilmente ser maquinadas, sendo que, por norma, precisam sempre de algum tipo de maquinagem nas partes funcionais [12].

Os tratamentos térmicos só poderão ser aplicados caso não exista propensão ao blister, ou seja, aparecimento de bolhas superficiais após tratamento térmico.

Uma desvantagem deste processo, é que existe uma maior probabilidade de aparecimento de porosidades internas nos fundidos. Este facto deve-se ao aprisionamento de ar durante o enchimento e solidificação, uma vez que é difícil evitar turbulências neste tipo de máquinas durante o vazamento [2].

Comparando agora ambas as tecnologias, a cadência produtiva de peças pela tecnologia de fundição injetada é superior à cadência produtiva pela tecnologia de fundição por gravidade. O custo da moldação é consideravelmente superior no processo de injeção, tornando-se viável apenas para grandes quantidades mensais ou diárias de peças.

O processo de fundição injetada apresenta baixa necessidade de mão de obra, um melhor acabamento superficial e tem um custo por peça mais baixo do que na tecnologia anteriormente analisada (para grandes produções). Este processo permite a produção de peças com tolerâncias apertadas e elevado tempo de vida. Para além disso, as roscas exteriores são facilmente obtidas, e também podem ser incorporados insertos metálicos [12].

Outra grande diferença deste processo relativamente à fundição por gravidade é que este apresenta um sistema de arrefecimento próprio. O arrefecimento é feito por água ou por óleos térmicos. Também pode ser feito a ar. Estes fluidos são forçados a passar em canais de arrefecimento que circundam a cavidade moldante. O arrefecimento destas moldações dá-se atualmente em canais lineares produzidos por tecnologias de maquinagem.

Em tecnologias de injeção de plástico já é comum o uso de canais de arrefecimento com geometrias curvilíneas, normalmente produzidas por tecnologias de MA. Algo que ainda não é utilizado em tecnologias de fundição injetada de metal. Os canais são normalmente lineares devido ao facto de não ser possível a produção de canais conformados através de tecnologias de maquinagem. Assim, é importante compreender de que forma poderá ser introduzida a tecnologia de MA nestes processos, de modo que a existência de canais conformados em moldações metálicas passe a ser possível de aplicar, garantindo assim um arrefecimento dirigido em peças produzidas por fundição injetada.

Para que seja permitido o arrefecimento da moldação, este é feito através de uma unidade de arrefecimento que é controlada por uma bomba que bombeia o líquido que passa nas tubagens. Estas estão ligadas desde um reservatório de líquido refrigerante até à moldação e sendo a si anexados com recurso a conetores. Estes últimos, têm como função, por sua vez, fazer com que a entrada do líquido nos canais refrigerantes se faça eficazmente e sem perdas, fazendo por isso uma boa vedação entre as tubagens e a moldação.

Para além disso, visto que a moldação não se encontra a uma temperatura constante, mas sim a uma temperatura que vai oscilando, são usadas válvulas solenoides que atuam através de termoelétricos inseridos nas paredes da moldação. Assim, haverá arrefecimento da moldação quando eles se encontrarem a temperaturas superiores às desejáveis, parando o arrefecimento quando esses termoelétricos atingirem temperaturas ótimas [14].

## **2.2 Sistemas de fabrico de canais de arrefecimento conformados**

Estuda-se ao longo deste subcapítulo as tecnologias existentes de MA que possam satisfazer as necessidades no que diz respeito à construção de moldações metálicas. Além disso, são averiguados quais os materiais e as empresas disponíveis para os processos de fabrico que parecem ser mais adequados.

É importante compreender que o processo de MA tem as suas características, e que estas não podem de modo algum comprometer o objetivo principal dos canais que é permitir uma transferência de calor entre o líquido que passa nos canais e a cavidade moldante.

### 2.2.1 Tipos de Impressão 3D Existentes e as suas Especificações

Existem diversas tecnologias para impressão 3D de metais, as quais estão a seguir representadas na tabela 2.5, considerando também as suas variantes.

Tabela 2.5 - Tecnologias de impressão 3D e respetivas variantes.

<b>Power Bed Fusion (PBF)</b> 1. <i>Selective Laser Melting (SLM)</i> 2. <i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>
<b>Material Jetting</b>
<b>Binder Jetting</b>
<b>Sheet Lamination</b>
<b>Direct Energy Deposition (DED)</b> 1. <i>LENS technology</i> 2. <i>Aerosol Jet technology</i> 3. <i>Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)</i> 4. <i>Laser Deposition Welding (LDW)</i>

Após uma breve leitura e estudo sobre cada tecnologia mencionada acima, conclui-se que as tecnologias que são mais favoráveis para aplicação em moldações metálicas são o PBF com a variante SLM, ou o DED com a variante EBAM. Por isso, são seguidamente explicadas, bem como as variantes escolhidas.

#### **Power Bed Fusion (PBF)**

A PBF é uma tecnologia de impressão 3D que permite a impressão de produtos com precisão. Esta técnica de impressão 3D usa uma fonte de calor (que pode ser laser ou feixes de eletrões) para a produção de peças com geometrias complexas [15].

No decorrer deste processo de impressão 3D são fundidas partículas de pó, camada por camada, fazendo-se incidir uma destas fontes de calor sobre o pó, fazendo então com que

se forme uma parte sólida [15]. Nesta tecnologia, o pó é espalhado e depois fundido, sendo todo o processo controlado através de um programa de computador e de uma câmara inerte [16].

Na figura 2.9, é possível observar uma representação do processo de impressão 3D com a variante de tecnologia PBF.

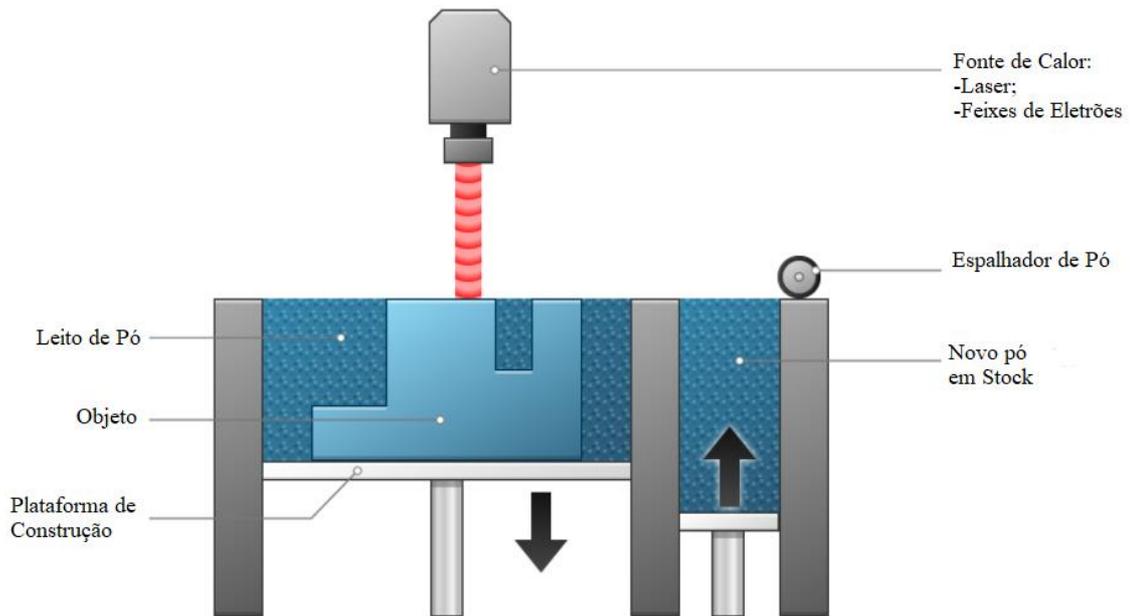


Figura 2.9 - Variação da pressão e da velocidade de injeção [15].

A PBF por laser é trabalhada a partir de um modelo CAD, orientado dentro de um volume sólido de construção de modo a incluir estruturas de suporte, corte em camadas planas, definição de um caminho de digitalização e arquivo de construção. Isto tendo por base um conjunto de especificações de parâmetros específicos de materiais e configuração específica da máquina atribuídas previamente [16].

A fusão ocorre pelo movimento da fonte de calor, neste caso o laser, que usa espelhos acionados por um galvanómetro, resultando a fusão e solidificação de faixas de fusão sobrepostas [16].

Por sua vez a PBF por feixes de elétrons é semelhante à PBF por laser, com a diferença de que a fonte de calor usada é feixes de elétrons dentro de uma câmara de vácuo. São usadas

bobinas eletromagnéticas para que rasterizem o feixe de elétrons em cada camada de pó. Este processo é feito em duas etapas. A primeira é a sinterização leve de cada camada de energia, para evitar a carga eletrostática e repulsão das partículas de pó. A segunda consiste numa passagem adicional de modo que se dê a fusão da região do volume da peça [16].

Esta variante permite velocidades superiores, pois o pó da liga já é um pouco sinterizado num leito, que normalmente é mantido a elevadas temperaturas, facilitando então o processo [16].

Esta tecnologia apresenta várias vantagens, nomeadamente o facto de permitir a construção de peças com designs complexos, o facto de existirem diferentes métodos para aplicação do PBF e de haver uma vasta gama de materiais que podem ser usados para esta finalidade.

Sendo a variante *Selective Laser Melting* a mais apropriada para a construção de excertos de MA a serem usados em moldações permanentes, descreve-se seguidamente as suas características.

A SLM atinge a fusão completa do pó com objetivo de criar peças sobressalentes e protótipos leves e resistentes de um único componente de metal, como ligas de alumínio. Assim, este método requer um suporte adicional para compensar a alta tensão residual e limitar a ocorrência de distorção. Alguns exemplos de aplicações são a joalheria, a odontologia e protótipos. É possível ver uma destas peças na figura 2.10.



Figura 2.10 - Peça produzida pela tecnologia *Power Bed Fusion* [17].

De entre os equipamentos existentes para este tipo de impressão 3D foram encontrados os que se encontram no Anexo A da marca *GE*. Na tabela 2.6 é possível encontrar um inserto da tabela do Anexo A com alguns parâmetros operatórios nesses mesmos equipamentos.

Tabela 2.6 - Detalhes operatórios dos equipamentos da tecnologia SLM.

Características	<i>Arcam EBM Spectra L</i>	<i>Arcam EBM Spectra H</i>	<i>Arcam EBM Q10plus</i>	<i>Arcam EBM Q20plus</i>	<i>Arcam EBM A2X</i>
Potência do feixe de eletrões	4,5W	6kW	3kW	3kW	3kW
Volume da construção	350 x 430 mm (D x A)	250 x 430 mm (D / H)	200 x 200 x 180 mm (x, y, z)	350 x 380 mm (D / H)	200 x 200 x 380 mm (x, y, z)

### Deposição Direta de Energia (DED)

A deposição direta de energia (DED) usa a energia térmica da fonte de calor para fundir o *stock* de alimentação à medida que é depositado no substrato. Devido à menor precisão e pós-processamento associado às peças impressas, o processo DED é pouco comum [15].

As principais vantagens das impressoras com tecnologia DED são a capacidade de produzir peças volumosas, o facto de oferecerem mais flexibilidade em termos de fonte de calor e também de matéria-prima. No que diz respeito à fonte de calor, pode ser utilizado um laser, arco ou fonte de calor de feixe eletrónico, e como *stock* de alimentação pode-se usar arame ou pó [15].

Os metais que podem ser impressos por meio da técnica de MA - DED incluem, principalmente, ligas de alumínio, cobre, titânio, aço inoxidável, aço ferramenta, cobre e níquel, e várias ligas de aço [15].

A tecnologia DED pode adicionar graus cinemáticos adicionais de liberdade para melhorar a qualidade e complexidade da parte impressa. Para além disso, o tempo de processamento desta tecnologia é muito mais rápido do que outros métodos, como o PBF, e as propriedades mecânicas podem ser ajustadas com precisão, através do controlo da microestrutura por meio de gradientes térmicos e controlo da composição química. Outro benefício da tecnologia DED é que a impressão pode ser feita sobre peças produzidas por processos de manufatura subtrativa. Por consequência, é necessária uma preocupação

acrescida com a manutenção desses sistemas no sentido de verificar as taxas de fluxo de pó e assim garantir a repetibilidade dos componentes impressos [15].

À semelhança do que ocorre no processo de PBF, o material acumulado é fechado numa câmara. O gás inerte pode ser injetado na câmara com purga cíclica ou pode ser libertado pelo bico para proteger o metal de solidificação, à semelhança do que acontece na soldadura por arco de metal a gás [15].

A tecnologia DED de alimentação de pó e arame é apresentado na figura 2.11 (a) e (b), respetivamente [15].

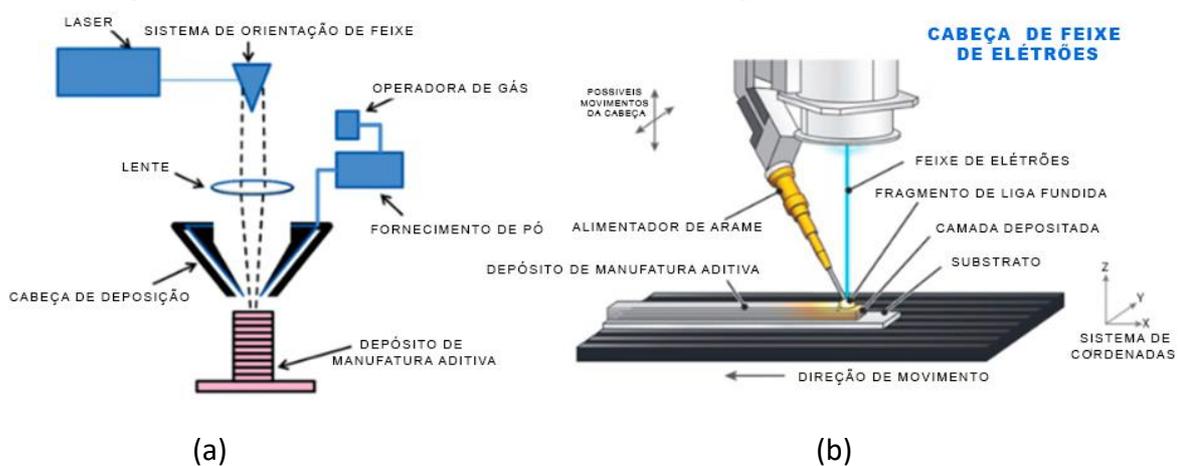


Figura 2.11 - Sistema DED de alimentação: (a) pó; (b) arame [18].

Na figura 2.12 é possível ver uma peça produzida por tecnologias DED.

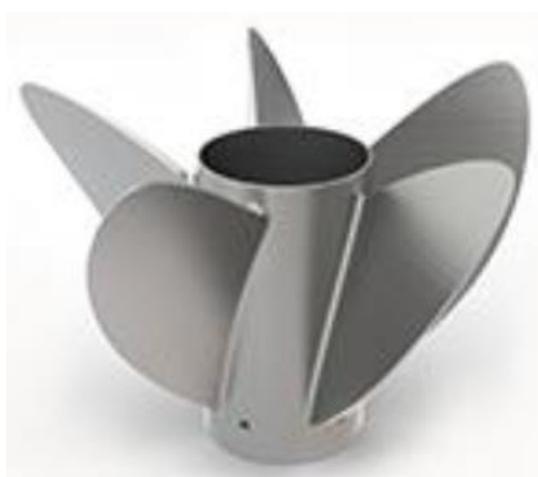


Figura 2.12 - Peça produzida pela tecnologia DED [18].

Existem equipamentos que trabalham com este processo. Estão apresentados na tabela 2.7 os seus parâmetros operacionais mais relevantes. O fornecedor *Optomec Inc* (EUA) oferece uma tecnologia que permite obter protótipos de metal mais densos, nomeadamente a tecnologia de deposição direta de energia (LENS). O fornecedor *Trumpf* também possui equipamentos adaptados às tecnologias DED.

Tabela 2.7 - Equipamentos OPTOMECC [19] e Trumpf [20].

Fornecedor	OPTOMECC				TRUMPF
Equipamento	CS250	CS 600	CS 800	CS 1500	TruLaser Cell 3000
Tipo de laser	500-2000 W Optical fiber laser	500 W fiber laser	500 W fiber laser	1kW IPG Fiber Laser	8000W Laser disco, fibra e diodo
Espessura da camada	0,001 mm	-	-	-	0,015 mm
Diâmetro do foco	-	0,67 mm	0,67 mm	-	-
Volume de construção	250 x 250 x 250 mm	600 x 400 x 400 mm	800 x 600 x 600 mm	900 x 1500 x 900mm	-
Nº de eixos	3-5	3	3	5	4

Como foi referido, a variante da tecnologia DED que tem proveito para este trabalho é a EBAM, sendo por isso explicada de seguida [15].

A MA de feixe de eletrões (EBAM) é uma tecnologia de fabrico aditivo que produz estruturas metálicas em grande escala. O feixe de eletrões (EB) deposita metal por meio do arame que é a matéria-prima, camada por camada, até que a peça atinja a forma quase líquida e esteja pronta para processos de acabamento por maquinagem. As taxas de deposição de material variam de 3 a 9 kg de metal por hora e os materiais compatíveis incluem titânio, tântalo e níquel. Esta técnica DED também pode ser usada para reparar peças danificadas [16].

### 2.2.2 Canais Conformados

É importante compreender quais são os requisitos necessários para o fabrico dos canais conformados, e se estes requisitos poderão ser mantidos com o uso de um novo processo de fabrico. Então, serve este subcapítulo para explorar os requisitos necessários para a produção e uso correto desses mesmos canais.

Como referido anteriormente, os canais de arrefecimento têm como principal função manter uma determinada temperatura da moldação através de processo de transferência de calor. A moldação irá rondar uma temperatura entre os 200 °C e 300 °C, pelo que devem ser seleccionados materiais cujas propriedades mecânicas não sejam afetadas a esta temperatura, ou seja materiais metálicos.

Dependendo da distância a que o canal de arrefecimento se encontra da superfície da moldação, vai arrefecê-la mais, ou menos. Pode-se observar a diferença desses gradientes térmicos na figura 2.13. Note-se que as cores mais frias representam temperaturas baixas e as cores mais quentes representam temperaturas altas.

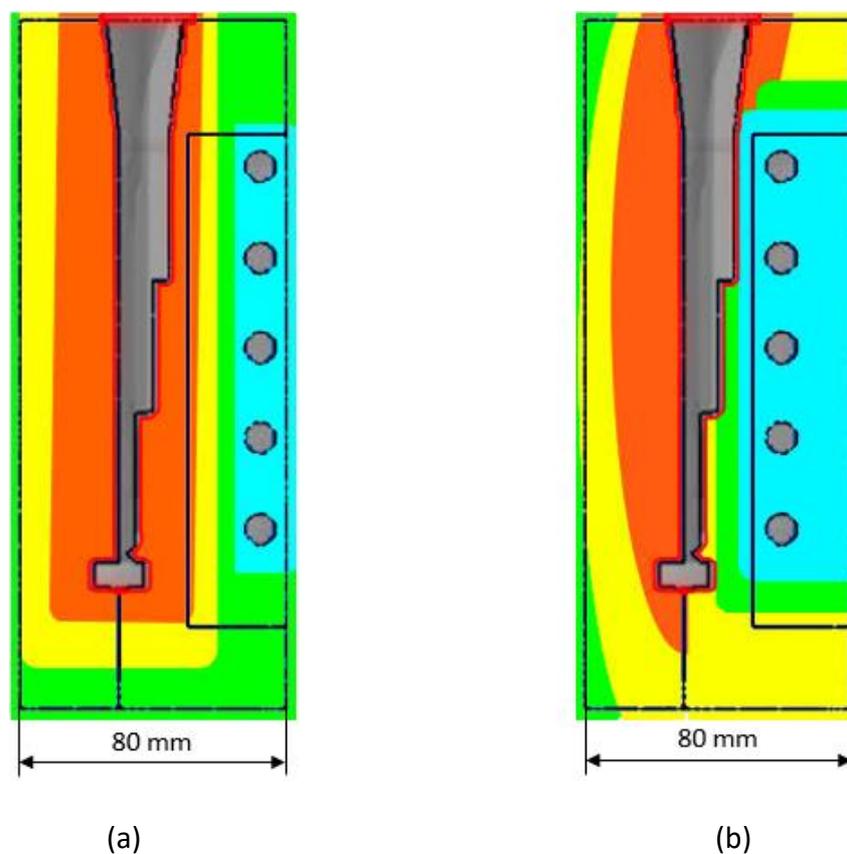


Figura 2.13 - Esboço da transferência de calor em (a) canais mais distantes da cavidade moldante e em (b) canais mais próximos da cavidade moldante.

Para além da distância a que o canal está da superfície da moldação, outras propriedades também se mostram relevantes aquando do controlo da temperatura da superfície da moldação. Entre elas estão a escolha do material e o projeto dos canais que deve ser feito cuidadosamente e com recurso a técnicas de simulação, de modo a otimizar ao máximo a transferência de calor e o arrefecimento dirigido [21].

Relativamente ao material que se deve escolher para o fabrico dos canais, este depende de algumas propriedades que são cruciais para um arrefecimento controlado tais como a condutividade térmica e o calor específico do material. O material a escolher está também dependente dos materiais que os equipamentos de MA têm disponíveis para operar, e por isso, desses deve-se optar pelo mais adequado. Finalmente, o material a escolher está dependente do substrato onde vai ser impresso o inserto.

É desejável que o material escolhido para os insertos que contêm os vazios – canais - tenha uma elevada condutividade térmica, bem como todo o material que os rodeia. Uma elevada condutividade térmica fará com que a transferência de calor da peça para os canais seja mais rápida e eficaz.

Por sua vez, o calor específico é outro fator importante na escolha do material dos canais, uma vez que vai ditar a energia que é necessário fornecer à moldação para que a sua temperatura varie.

Dado que o calor específico ( $cp$ ) de um material depende da sua massa ( $m$ ), como representado pela equação 2.1, então quanto menor a massa entre os canais e a cavidade (parede mais fina), melhor se dará o arrefecimento. É necessário ter em atenção, contudo, que a aplicação de paredes finas entre os canais de arrefecimento e a cavidade moldante pode levar ao seu empeno, por estar em contacto sucessivo com altas temperaturas.

$$Q = cp \times m \times \Delta T \quad (2.1)$$

$Q$  representa o calor transferido e  $\Delta T$  representa a variação de temperatura resultantes da transferência de calor [21].

O fluído refrigerante não pode aderir nem reagir quimicamente com o material dos canais. Por isso, os fluídos refrigerantes que são normalmente utilizados são a água ou óleos térmicos [13].

No desenvolvimento do projeto deve-se ter o cuidado de aumentar a área de transferência de calor, ou seja, aumentar o número de canais e o seu diâmetro tanto quanto possível. Também, toda a superfície entre os canais conformados e a moldação deve ter a melhor rugosidade superficial possível, reduzindo a Resistência Térmica de Contacto (RTC) e otimizando a condutividade térmica. Também no projeto dos canais, se deve ter o cuidado de reduzir ao máximo a distância destes à superfície da moldação. Deste modo a transferência de calor será melhorada [21].

Nos canais de arrefecimento, o calor absorvido pelo fluído vai ser dissipado na unidade de controlo de temperatura. O fluído refrigerante circula nesses canais pela ação de uma bomba. Por outro lado, também uma parte residual do calor da moldação e do inserto vai acabar por ser dissipado para o ar à volta da moldação, por condução. A equação 2.2 apresenta o cálculo do balanço térmico da moldação [13].

$$Q = Q_l - Q_f - Q_d \quad (2.2)$$

$Q$  representa a quantidade de calor que se consegue extrair do fundido;  $Q_l$  representa a quantidade de calor introduzida pelo metal vazado;  $Q_f$  representa o calor escoado pelo fluído; e  $Q_d$  o calor dissipado da moldação para o ar.

A temperatura da moldação vai depender da sua geometria, do calor transportado pelo fluído e da unidade de controlo de temperatura [13].

### **Fluídos Refrigerantes para Circulação nos Canais**

Quanto aos fluidos refrigerantes que podem ser usados na refrigeração de moldações, existe a água e o óleo [13].

Relativamente à água, tendo em consideração que as temperaturas do fundido são muito elevadas, no aquecimento da moldação o seu uso é difícil. De facto, a sua temperatura de evaporação é aos 100 °C, provocando uma transferência de calor por convecção e não por condução. Deste modo, a eficiência da transferência de calor será menor e acabará por não aquecer a moldação o suficiente. Também, no arrefecimento acontecerá o mesmo, uma vez que as moldações devem permanecer à volta dos 200 °C. Ora, como a água estará a 100 °C no máximo, a grande variação de temperatura entre a moldação e o fluído

refrigerante irá gerar grandes gradientes térmicos conduzindo à tensão térmica entre os canais e a superfície da moldação. Esses gradientes irão posteriormente gerar fadiga térmica e fissuras. Estas fissuras poderão ter graves efeitos como o vazamento do líquido do canal de arrefecimento para a cavidade com metal líquido, o que poderá ser catastrófico e indesejável.

Por estes motivos, o uso de canais de arrefecimento a água está restringido a áreas mais afastadas da superfície da moldação, fazendo com que o efeito de diminuição de temperatura seja amplamente reduzido.

Assim, resta o óleo que pode ser usado como refrigerante e não apresenta os mesmos problemas que a água. De facto, os óleos térmicos podem operar perto da cavidade moldante e sem atingir a evaporação. De notar, contudo, que este pode ser problemático quando se trata de risco de incêndio e custos de manuseio [21]. Atendendo às suas características gerais, o seu uso é o mais adequado, contudo deve-se ter em conta que não pode haver fugas de óleo, obrigando a que o projeto de refrigeração e bombeamento de fluido seja o mais seguro possível.

Realça-se o facto de a universidade apenas ter disponível água como fluido refrigerante, e que por isso, será este o fluido utilizado ao longo das experiências laboratoriais.

### **Influência da Rugosidade nos Canais de Refrigeração**

Sendo o objetivo deste estudo o desenvolvimento de moldações metálicas com uso da MA para produção de um inserto que contenha canais de refrigeração, torna-se relevante estudar a influência que a rugosidade dos canais terá após a sua construção, e se é favorável ou não à transferência de calor.

Como explicado anteriormente, os processos de impressão 3D produzem peças camada a camada, onde cada uma vai ser fundida em diferentes direções. Isto acaba por dar à peça final propriedades mecânicas melhores.

Pelas fichas técnicas encontradas (podem-se ver no anexo C e D) para os diversos materiais (averiguados em capítulos seguintes) para o inserto em MA, verificou-se que as rugosidades superficiais das peças processadas por MA terão por volta de 4 a 6 micrómetros.

Se o escoamento for laminar, a rugosidade não tem influência na transferência de calor ou no atrito. De forma contrária, num escoamento turbulento, a rugosidade da parede,

superfícies artificialmente corrugadas ou aplicações de alhetas internas, fazem aumentar o coeficiente convectivo ( $h$ ) [22].

No interior dos canais de arrefecimento o escoamento será turbulento [23]. Portanto, pode-se concluir, que a rugosidade derivada do processo de fabrico de MA não é negativa para o processo de transferência de calor, e que seria positivo que esta rugosidade fosse superior.

### **3. CONCEÇÃO DA MOLDAÇÃO PARA VAZAMENTO DE METAL LÍQUIDO E OTIMIZAÇÃO DA COQUILHADORA**

Ao longo deste capítulo é apresentada uma árvore de objetivos para alcançar o objetivo principal, sendo este o desenvolvimento da coquilhadora e da moldação. A coquilhadora, quando iniciado este trabalho, já se encontrava na fase de prototipagem, sendo que apenas sofreu algumas alterações. O desenvolvimento da moldação passou pela fase de idealização onde se estabeleceu uma ideia sobre o que se queria construir, e posto isto, propuseram-se e escolheram-se soluções. Estas soluções seguem a ideia inicialmente formada, e consistem em moldações que recorrem ao arrefecimento com tecnologias de MA, sendo que também contemplam o tipo de MA que deve ser utilizado em cada uma. A solução a ser escolhida de entre as idealizadas deve ser viável a nível de projeto e ao mesmo tempo, ao nível económico. São escolhidas as composições dos materiais que a moldação e o inserto de MA devem ter, e as que, ao mesmo tempo, estão disponíveis para serem processadas por estas tecnologias. Deste modo, a escolha do processo de impressão acabará por ficar também mais restringido aos materiais com características compatíveis com a moldação.

De seguida, é estudada em particular a moldação base sendo esta pensada para produção da peça em fundição por gravidade. Também o inserto, e o modo como será apertado à moldação base é alvo de estudo neste capítulo. Portanto, serão projetadas duas moldações, uma com MA e outra sem.

#### **3.1 Definição dos objetivos do trabalho**

De modo a estabelecer um objetivo para o correto desenvolvimento do projeto da moldação, foi estabelecida uma árvore de objetivos com o objetivo principal decomposto em quatro objetivos secundários, e quatro objetivos terciários que ajudam a atingir o objetivo principal. Estes objetivos estão esquematizados na figura 3.14.

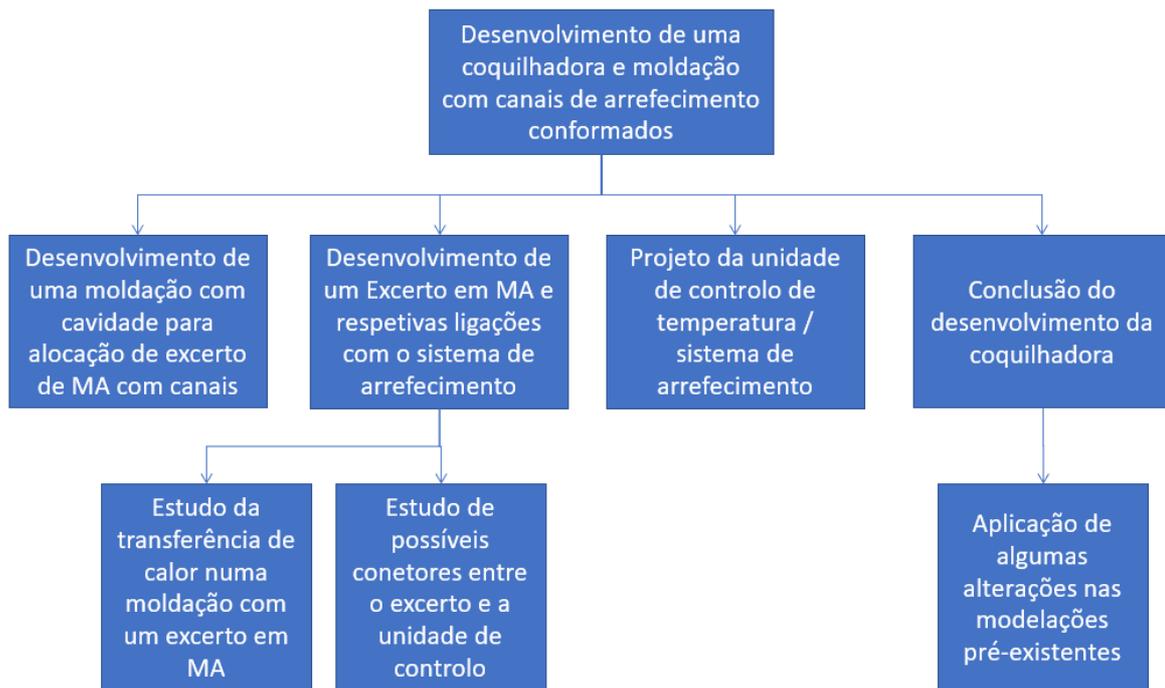


Figura 3.14 - Árvore de Objetivos.

Para que o objetivo principal seja atingido, um dos objetivos secundários a atingir é o desenvolvimento de uma moldação que apresente canais de arrefecimento não lineares e que possam contornar corretamente a cavidade (ao longo deste capítulo vai-se compreender que isto é possível alocando um inserto de MA numa cavidade previamente formada na moldação base). Para que este objetivo secundário seja cumprido, deve-se ter em conta as características das moldações atuais (descritas anteriormente no capítulo 2), que também devem ser as mesmas da nova moldação a desenvolver, e deve-se modelar a moldação e prosseguir para a sua produção.

Outro objetivo secundário consiste no desenvolvimento e projeto de um inserto em MA e num posterior estudo sobre a forma como este será conectado à unidade de controlo de temperatura sem que haja fugas do fluido de arrefecimento. Para que este seja alcançado, é importante atingir um objetivo terciário, que consiste em compreender como se vai dar a transferência de calor com o uso de um inserto produzido em MA. Também é importante ter em consideração o conteúdo explicado no capítulo 2 acerca das tecnologias de MA, de modo que seja possível a produção de um inserto que seja eficaz no arrefecimento e que não cause danos à moldação ou ao fundido. Para além deste objetivo terciário existe um outro que consiste em perceber quais os conetores que se devem utilizar no inserto para

que se possa prever nas modelações e desenhos técnicos as entradas para eles, de modo que não haja então fugas do fluido. Feito isto é possível passar à modelação do inserto que será posteriormente impresso pela tecnologia escolhida no seguinte capítulo e, assim, concretizar o objetivo secundário sobre o desenvolvimento do inserto de MA.

Relativamente ao terceiro objetivo secundário, este consiste em projetar a unidade de controlo de temperatura, ou seja, o sistema de arrefecimento.

Por fim, é necessário completar um outro objetivo secundário garantindo que a coquilhadora está pronta a ser posta em funcionamento. Para isso, é importante atingir outro objetivo terciário compreendendo, assim, que peças e em que quantidades vão ser precisas.

### **3.2 Desenvolvimento da moldação**

Ao longo deste subcapítulo são escolhidas as soluções de aplicação da MA que melhor se adequam. Também são escolhidas as tecnologias de MA que são mais favoráveis e os materiais que estão disponíveis para a produção do inserto através dessas tecnologias.

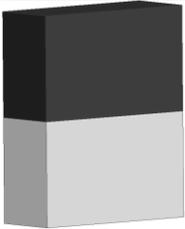
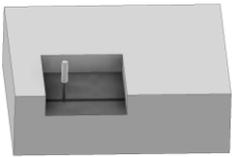
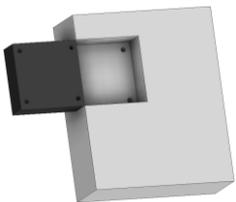
#### **3.2.1 Escolha de uma solução para aplicação do inserto de MA**

Na tentativa de solucionar o problema em questão com utilização da MA, surge um dilema: a fabricação da moldação através deste processo, apesar de permitir gerar a rede de canais pretendida, não permite a execução de uma moldação com o acabamento superficial exigido num processo como a Fundição Injetada, o que irá afetar a qualidade das peças obtidas. Por isso, será necessário aplicar processos de maquinagem, em particular de acabamento para que as peças possam apresentar as qualidades superficiais pretendidas. E isso fará com que haja um aumento do custo da moldação (mesmo que pequeno comparado ao preço da moldação impressa). Para além disso, esta solução é muito cara, por causa do próprio processo de fabrico e também pelo facto de ser muito lenta. Isto leva à necessidade de idealização de soluções que se apresentem mais viáveis. Assim, pode ser possível fazer apenas meia moldação com MA, aplicando esta na zona onde se pretende que haja arrefecimento dirigido.

Outra solução passa pela obtenção da parte que se encontra do lado externo à cavidade moldante da moldação por processos de MA, e a parte interna, em contacto com a cavidade moldante, por processos de manufatura subtrativa, sendo necessário fazer a

junção das partes posteriormente, caso se faça por tecnologia de SLM. No caso de se usarem tecnologias DED a impressão da parte externa poderá ser feita diretamente na moldação. Esta última solução, pode ser aplicada em toda a área externa da moldação, ou então apenas nas zonas que precisarem de arrefecimento localizado, e nesse caso aplicar-se-á insertos de MA nas moldações. De modo a ser possível comparar todas as soluções que se podem aplicar apresenta-se a tabela 3.8, especificando as respetivas características. Assim, será possível observar cada uma e perceber os seus pontos fortes e fracos.

Tabela 3.8 - Soluções de implementação da MA em moldações de fundição injetada.

Características	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
<b>Descrição</b>	Moldação em MA na totalidade	Parte da moldação feito por MA	MA (DED) diretamente na moldação	Inserto em MA fixo com parafusos à moldação
<b>Configuração</b>				
<b>Processos de Fabrico</b>	DED ou SLM	Maquinagem + DED	Maquinagem + DED	Maquinagem + DED ou SLM
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de apenas um processo de fabrico;</li> <li>• Não há necessidade de fazer junções;</li> <li>• Entre DED e SLM é mais barato se for SLM;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais barato pelo uso de menos MA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais barato pelo uso de ainda menos MA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Troca do inserto de MA com facilidade;</li> <li>• Mais barato pelo uso de ainda menos MA;</li> <li>• Abrange mais tecnologias de MA;</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muito caro se for DED;</li> <li>• Exige que a cavidade da moldação seja maquinada antes de usar para dar bons acabamentos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais caro;</li> <li>• Dificil encaixe da moldação no sistema de MA;</li> <li>• Dificuldade na permanência da moldação a temperaturas altas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade na permanencia da moldação a temperaturas altas;</li> <li>• Uso de apenas uma tecnologia de MA;</li> <li>• Dificil encaixe da moldação no sistema de MA;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de desenvolver um sistema de fixação;</li> </ul>

Características	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
<b>Materiais de MA</b>	Aço 316L Aço Maraging Aço H13	Aço 316L Aço H13	Aço 316L Aço H13	Aço 316L Aço Maraging Aço H13
<b>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>) Direção Z</b>	Aço 316L: 5-10 Aço Maraging: 5-6 4-7 (direção XY) Aço H13: 45 - 53	Aço 316L: 5-10 Aço H13: 45-53	Aço 316L: 5-10 Aço H13: 45-53	Aço 316L: 5-10 Aço Maraging: 5-6 4-7(direção XY) Aço H13: 45-53

De forma sucinta, apresenta-se a tabela 3.9 onde constam os diversos fatores que devem ser ponderados na escolha da solução, e o respetivo grau de vantagem comparativa.

Tabela 3.9 - Comparação de soluções.

Fatores	Moldação em MA na totalidade	Parte da moldação feito por MA	MA (DED) diretamente na moldação	Inserto em MA fixo com parafusos à moldação
<b>Custo</b>	----	---	--	-
<b>Tempo de Produção</b>	----	---	-	--
<b>Junção</b>	++++	-	--	+++
<b>Facilidade de Produção</b>	++	-	--	+
<b>Facilidade de ajuste das moldações</b>	---	---	---	+++
<b>Tempo de vida (fadiga térmica)</b> *	+	--	--	+
<b>Totais</b>	11-/7+	13-	12-	3-/8+

\*Isto é dependente da expansão térmica de ambos os materiais

---- péssimo      -- negativo      + um pouco positivo      +++ muito positivo  
 --- muito negativo      - um pouco negativo      ++ positivo      ++++ótimo

De acordo com a tabela 3.9 pode-se ver que a solução mais adequada dadas as vantagens e desvantagens é a solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação. Esta consiste na produção de duas partes, sendo que a primeira, produzida em MA, que se aperta à segunda

parte, que é a restante moldação, através de parafusos. Este processo de manufatura poderá ser feito por DED ou PBF como referido no capítulo anterior. Uma vez que o processo de SLM (PBF) é um processo mais barato e num estado mais desenvolvido, este processo será o escolhido para a parte feita por MA. Como alternativa poderá ser escolhido o processo EBAM (DED).

Apesar da solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação - ser a mais vantajosa, não será a única a ser estudada. A solução 3 - MA (DED) diretamente na moldação - também vai passar por verificações experimentais, de modo a garantir que caso a solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação - não seja tão vantajosa quanto se esperava, exista sempre uma alternativa também estudada e que permita comparações, para posterior escolha da melhor solução.

### Escolha dos Materiais da Moldação e da parte de MA

De modo a ser possível a conceção das moldações é importante escolher e averiguar os melhores materiais para a sua composição. Na tabela 3.10 apresenta-se, uma lista de possíveis materiais que as moldações para fundição injetada podem ter, segundo a Ramada Aços.

Tabela 3.10 - Possíveis materiais que contemplam moldações de fundição injetada [24].

Material	Normas	Densidade	Coefficiente de Dilatação Térmica [10 <sup>-6</sup> m/mK]	Condutibilidade Térmica [W/mK]
<b>1- MG50 - Uddeholm Orvar Supreme</b>	EN: X 40 CrMoV5-1-1 AISI: H13 Premium DIN: X 40 CrMoV5-1 W.NR.: 1.2344	7,80	20 a 400°C: 12,60 20 a 600°C: 13,20	20°C: 25 600°C: 29 700°C: 30
<b>2-Uddeholm Dievar</b>	W.NR.: (Patente)	7,80	20 a 400°C: 12,70 20 a 600°C: 13,30	600°C: 31 700°C: 32
<b>3-Uddeholm Vidar Superior</b>	EN: (X37CrMoV5-1) AISI: (H11) Premium DIN: (X 38 CrMoV5-1) W.NR.: (1.2343)	7,80	20 a 200°C: 11,60 20 a 400°C: 12,40 20 a 600°C: 13,20	600°C: 30 700°C: 31
<b>4-Uddeholm Unimax</b>	W.NR.: (Patente)	7,79	20 a 200°C: 11,50 20 a 400°C: 12,30	300°C: 25 600°C: 28

De acordo com a informação apresentada na tabela 3.10 concluiu-se que os coeficientes de dilatação térmica variam de 11,60 até 13,30  $\mu\text{m}/\text{mK}$ , e que a condutibilidade térmica para as temperaturas a que a moldação vai estar a operar (entre 200 e 300 °C, sendo que na fase de

vazamento pode atingir 450 a 500 °C), poderá variar entre 25 e 30 W/mK. Assim, escolheu-se o material 1 - H13.

Relativamente aos materiais que podem constituir a parte de MA, encontrados em função de algumas máquinas próprias para alguns tipos de MA, pode-se consultar o Anexo B. Analisando as características dos materiais que podem ser produzidos por tecnologias de MA, mais em particular para os materiais que podem ser utilizados pela tecnologia SLM, surgem como opções de eleição o aço 316L (que na tabela B.20 do anexo B se apresenta como *Laserform 316L*) e o aço Maraging A. Estes materiais foram os eleitos porque apresentam bons coeficientes de transferência de calor e bons coeficientes de dilatação térmica. Embora os coeficientes de transferência de calor do material para MA sejam um pouco superiores aos da moldação, isso pode não ser prejudicial, porque para o caso da solução 4 - Inseto em MA fixo com parafusos à moldação - durante o aquecimento o material vai expandir e como está preso com parafusos não vai correr o risco de sofrer fadiga térmica e, com o tempo, acabar por gerar fissuras, separando-se da moldação. Também o facto de se expandir vai fazer com que expanda em favor da moldação fazendo com que se aproxime mais da superfície diminuindo a resistência térmica de contacto (RTC) existente entre as partes. Para as soluções 2 - Parte da moldação feito por MA - e 3 - MA (DED) diretamente na moldação -, referidas na tabela 3.8, pode ser negativo ter diferenças muito grandes de coeficientes de expansão térmica entre ambos os materiais. Tal pode gerar fissuras na zona da junta entre ambos os materiais. Contudo, as diferenças apresentadas não são assim tão diferentes, sendo aceitáveis.

Caso se opte pela tecnologia DED os materiais eleitos serão o aço 316L e o aço H13, de acordo com a empresa que se contactou (a Norcam) e que apenas tem disponível o material H13 para produção.

### **Comparação dos Materiais Eleitos para a tecnologia SLM**

Como se pode observar no Anexo C, as propriedades mecânicas do aço 316L depois de recozido tendem a diminuir, excetuando a ductilidade, que aumenta. Para o aço Maraging, o mesmo não se aplica, pois no geral todas as suas propriedades aumentam para o dobro depois do tratamento térmico efetuado.

Relativamente aos acabamentos superficiais que esta tecnologia apresenta, no aço 316L pode-se obter uma rugosidade de 5 a 10  $\mu\text{m}$  na direção Z ( ver figura 3.15 – a rugosidade superficial está representada na figura, sendo que as cores a verde claro representam os 5  $\mu\text{m}$

e que a vermelho, ou quanto mais próximo dessa cor, mais próximo dos 10  $\mu\text{m}$  se encontra a rugosidade); para o aço Maraging a rugosidade superficial que se pode obter ronda os 4 a 7  $\mu\text{m}$  na direção XY e 5 a 6  $\mu\text{m}$  na direção Z.

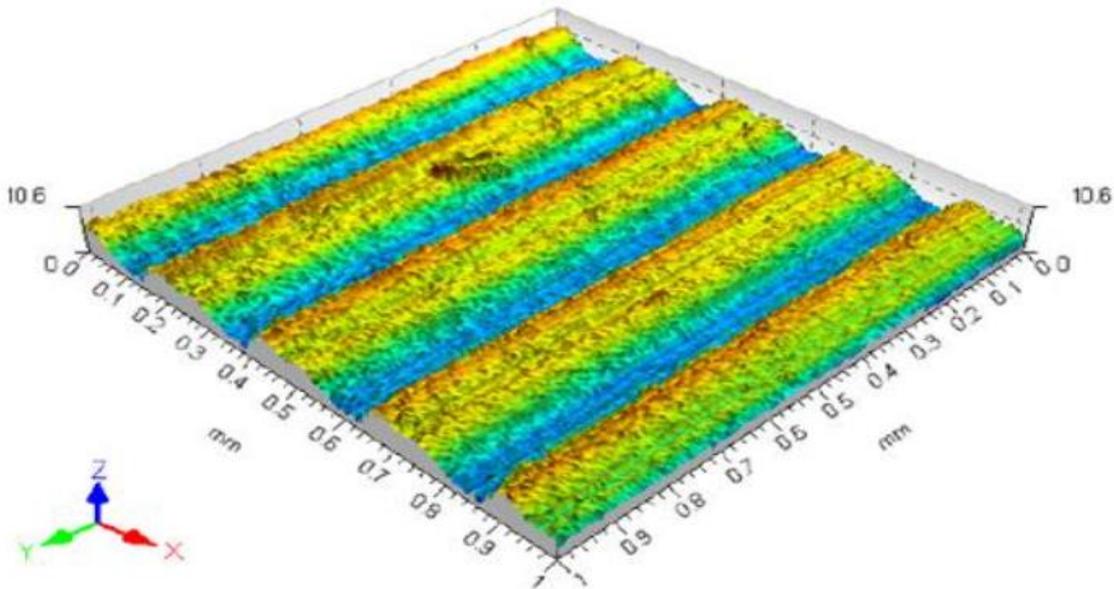


Figura 3.15 - Variação da rugosidade numa superfície até 10 micrómetros [25].

Pode-se, assim, concluir que a nível de propriedades mecânicas o aço Maraging é melhor. Já a nível de rugosidade superficial o aço 316L é equivalente ao aço Maraging uma vez que as rugosidades são tão baixas que vão ter mais ou menos a mesma influência na transferência de calor.

No que diz respeito a coeficientes de expansão térmica e de condutibilidade térmica do aço 316L, recorrendo aos valores que se encontram na tabela do anexo B, foi possível estimar esses valores para as temperaturas a que a moldação vai estar sujeita, ou seja 200 a 250  $^{\circ}\text{C}$ . Assim, o coeficiente de dilatação térmica e de condutibilidade térmica do aço 316L a 250  $^{\circ}\text{C}$ , é, respetivamente, de  $16,7 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$  e 18 W/mK. Para o aço H13, de igual modo recorreu-se aos valores tabelados no anexo B e estimou-se o valor da condutibilidade térmica que resultou num valor aproximado de 17 W/mK.

Quanto ao coeficiente de dilatação térmica, recorreu-se às informações prestadas pela empresa que foi escolhida para a produção dos provetes de aço Maraging (Renishaw), resultando num coeficiente de dilatação térmica de  $10,3 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$ .

### **Comparação dos Materiais Eleitos para a tecnologia DED**

Dado que o aço 316L não pode ser produzido na empresa fornecedora Norcam (uma das avaliadas como fornecedora), apenas se vai averiguar as características do aço H13. Este, após tratamento térmico de alívio de tensões, apresenta propriedades mecânicas em geral muito boas, com tensões de cedência e de rotura muito elevadas e uma deformação bastante baixa, tal como se observou acima, no aço Maraging.

Relativamente aos acabamentos superficiais obtidos através desta tecnologia, o aço H13 podem-se obter rugosidades entre 45 e 53  $\mu\text{m}$ , como se pode observar no Anexo D.

Também, para este material se recorreu aos valores tabelados do anexo B para estimar o valor dos coeficientes de dilatação térmica e de condutibilidade térmica. Portanto, a 250 °C para o aço H13 o coeficiente de dilatação térmica será de  $11,3 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$  e a condutibilidade térmica será de aproximadamente 25,6 W/mK.

### **3.3 Projeto da moldação e da coquilhadora**

O projeto da coquilhadora deu-se previamente ao início deste trabalho, pelo que quando este trabalho foi iniciado, já existia um conceito e um protótipo da coquilhadora, bem como um *design* das moldações a usar. Ao protótipo da coquilhadora foram adicionadas novas peças, em particular os extratores que ainda não tinham sido projetados. E também foram aplicadas algumas alterações devido à aplicação de novas peças, em particular a placa dos extratores que passou a ter mais 6 furos roscados, permitindo assim a alocação dos extratores. As moldações sofreram severas alterações ao modelo inicialmente fornecido pelo projeto, nomeadamente nos alimentadores, uma vez que estes não existiam numa primeira modelação. Foram também feitos furos passantes para aplicação dos extratores e foram ainda relocados os extratores que permitem a movimentação de uma das meias moldações durante a abertura, uma vez que a aplicação de alimentadores exigiu essa alteração.

De modo a ser possível aplicar novas tecnologias de arrefecimento em fundidos vazados em moldações metálicas com canais conformados produzidos por MA, é importante estudar uma peça que seja o pior caso possível em tecnologias de fundição atuais. Ou seja, atualmente durante os processos de fundição, o arrefecimento é iniciado na zona mais fina da peça e termina na sua zona mais espessa, sendo que o enchimento se inicia pela zona mais espessa, servindo de acesso para zonas mais finas. Contudo, ao inserir canais que permitem um arrefecimento localizado e dirigido, deixa de ser necessário garantir que a parte mais fina da

peça seja a primeira a ser solidificada, pois, o fluido terá a capacidade de manter a zona fina à temperatura desejada e alta o suficiente de modo que seja evitado o seu arrefecimento precoce. De igual modo, o fluido refrigerante será capaz de arrefecer em primeiro lugar as zonas mais espessas, e por fim as zonas mais finas. Assim, é necessário validar este conceito com um modelo a fundir que inverta a sequência atual de enchimento de uma cavidade moldante.

Apresenta-se, na figura 3.16, o modelo que se vai estudar neste trabalho, sendo que este representa o pior caso possível de peça a fundir através de tecnologias atuais. Se o uso da MA permitir que esta peça se encha na totalidade, solidifique em condições e finalmente não apresente rechupes, então a MA e os canais conformados nela construídos são efetivamente a solução para os defeitos gerados em processos de fundição injetada.

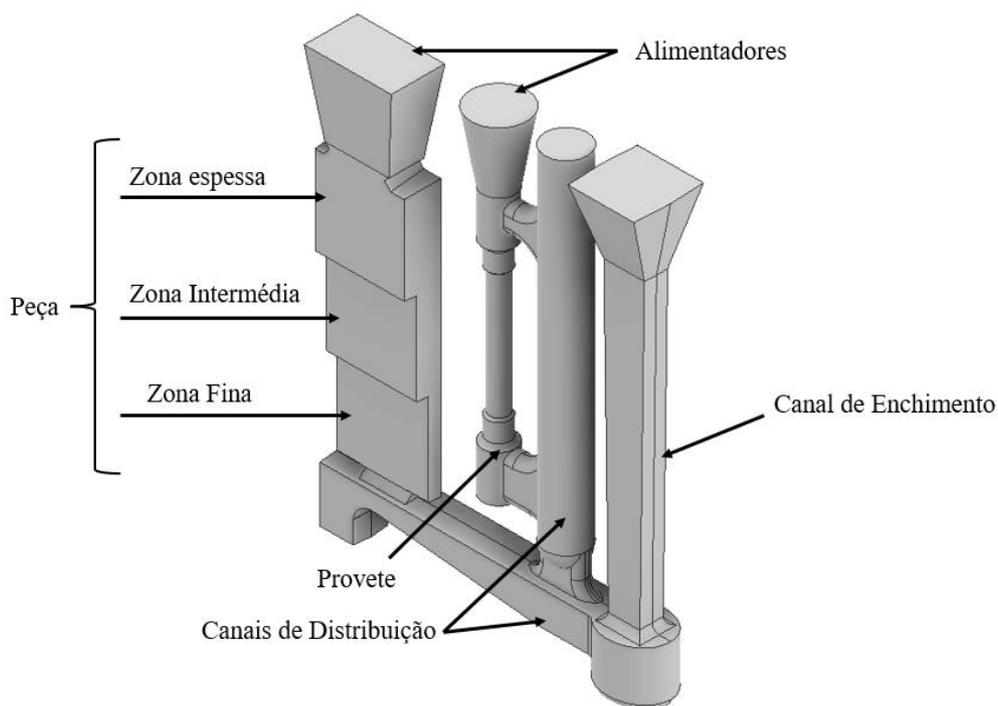


Figura 3.16 - Componentes da cavidade da moldação.

### 3.3.1 Análise do modelo proposto

Analisando os componentes do modelo acima representado, o cilindro intermédio é um canal de distribuição por onde o metal vai subir e encher o provete através dos ataques. Em cima do provete há o alimentador. Este é importante para que se encha o provete com o mínimo

de turbulência possível conseguindo, assim, obter uma sanidade microestrutural elevada, característica ideal para provetes.

Neste caso, o sistema de gagem tem uma alimentação pelo topo.

A peça apresentada mais à esquerda apresenta zonas finas, de média espessura e espessas, formando uma “escada”. Assim, torna-se possível estudar diferentes espessuras, de modo que, quando inserida a parte de MA na moldação, se promovam arrefecimentos localizados diferentes. O inserto de MA será inserido na zona da “escada”, sendo que apenas abrangerá essa área, excluindo, portanto, outras áreas como as do provete e do canal de distribuição.

Enquanto modelo tipicamente utilizado para tecnologias de fundição, não faria sentido encher da zona mais fina para a mais espessa. Contudo a peça foi colocada assim propositadamente, de modo a estudar metodologias de projeto de fundição juntando a MA capaz de inverter o sistema de alimentação. Isto permite que se perceba se com canais não lineares de arrefecimento se pode introduzir uma cinemática de arrefecimento totalmente diferente. Para isso, parte-se logo para o pior cenário em que se vai ter tendência natural a arrefecer inicialmente na zona menos espessa.

Deste modo, o arrefecimento / aquecimento desta peça com recurso a tecnologias de MA, dar-se-á do seguinte modo: inicialmente as zonas fina e média são mantidas a temperaturas quentes, permitindo que toda a peça seja preenchida com metal líquido. Quando toda a cavidade estiver preenchida é iniciado o arrefecimento da zona mais grossa. Esta irá arrefecer, sem ter capacidade de contrair. Posteriormente, inicia-se a solidificação da zona intermédia, fornecendo aos canais de arrefecimento fluido refrigerante a baixas temperaturas, e finalmente termina-se a solidificação na zona fina.

O estudo deste modelo preenche na totalidade os objetivos deste trabalho na medida em que fomenta a diminuição da contração volumétrica que tipicamente acontece durante a solidificação e promove o aquecimento / arrefecimento localizado.

Para além disso, se o uso de MA permitir alterar a cinemática de solidificação poder-se-ia deixar de preocupar em minimizar a complexidade das peças, porque localmente poder-se-ia aquecer, evitando assim os problemas de distorções geométricas e variações dimensionais.

Para além de ser estudado este modelo numa moldação sem qualquer tipo de arrefecimento, estudar-se-á outra moldação, ao qual se vai adicionar um inserto com tecnologia de MA na moldação que assim vai permitir compreender o que varia de uma moldação para a outra e quais as características que são melhoradas.

Sendo o trabalho estudado, pensado para processos de fundição injetada e não sendo possível nas instalações da universidade fazer testes experimentais com esse tipo de fundição, os testes serão então realizados com técnicas de fundição por gravidade, cujo arrefecimento por MA terá de ser adaptado a estas moldações. Para estes testes, teve-se em consideração que o canal de descida é o apropriado para moldações de fundição por gravidade e não por fundição injetada. Assim, essa é a única diferença de uma moldação para a outra.

### 3.3.2 Moldação para produção da peça sem uso de MA

É agora importante projetar a moldação para obtenção da peça acima mencionada.

A cavidade moldante será o negativo do modelo acima mostrado, e que se segue na figura 3.17. No anexo E é possível ver os desenhos técnicos com as respetivas cotas da moldação, que está seguidamente representada.

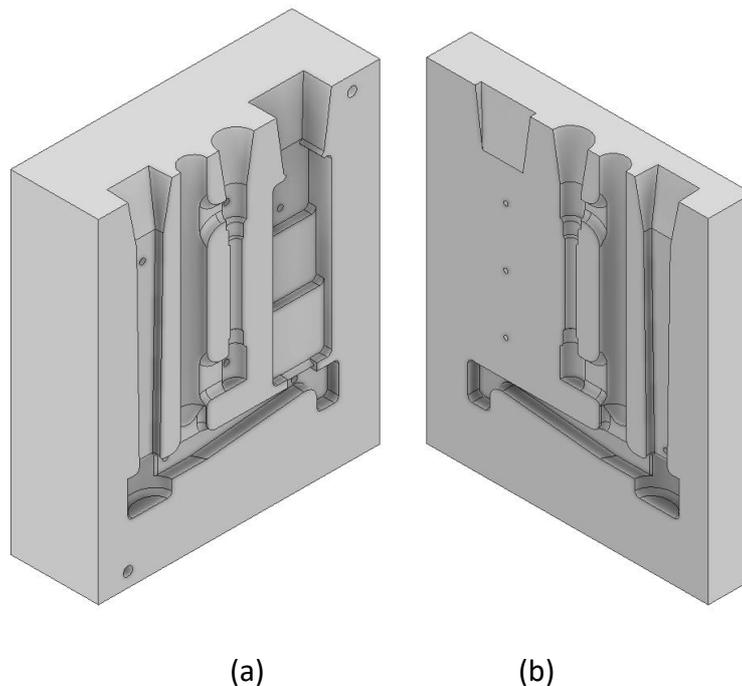


Figura 3.17 - Cavidade moldante.

Para além do negativo da peça a obter, tem-se ainda um conjunto de furos em ambas as partes da moldação. Os furos das esquinas da meia moldação da figura 3.17 (a), de diâmetro superior têm como função fazer a abertura da moldação depois da solidificação do metal, através de extratores de maior diâmetro. Para além disso, auxiliam o guiamento com as partes traseiras da coquilhadora, como a placa das resistências móvel e a placa dos extratores. Estes furos sofreram alterações na sua localização com o início deste trabalho. Inicialmente, estariam

posicionados numa localização que, com a aplicação de alimentadores, deixaria de ser favorável.

Os furos presentes na meia moldação da figura 3.17 (b) foram assim posicionados para se colocar termopares. Foram colocados nestes locais de modo a permitir saber a variação de temperaturas em cada uma das partes da peça e também a temperatura do metal líquido no canal de descida.

Os furos presentes na cavidade da meia moldação da figura 3.17 (a) têm como função a alocação de extratores de menor diâmetro, para facilitar a extração da peça depois de solidificada.

### **Extratores de diâmetro inferior**

Os extratores devem ser posicionados nas moldações em função de alguns fatores. Um dos fatores é a zona onde se coloca o extrator no fundido, que deve ser uma zona de maior área possível para facilitar a extração da peça. Deve-se ter o cuidado de escolher a zona correta para colocar os extratores uma vez que devem ser posicionados em zonas que não empenem a peça ao extraí-la. Aquando da extração da peça, esta vai estar quente e a aplicação de forças resultantes dos extratores pode empená-la. Por isso, os extratores devem ser aplicados em zonas de menor importância, como canais de distribuição, canais de descida ou zonas que não vão influenciar o desempenho da peça. Tomando como exemplo os provetes, colocaram-se os extratores nas extremidades do provete. Isto porque a zona que será estudada aquando de ensaios de tração será a zona central do provete e nunca as suas extremidades. Se se colocassem os extratores no meio do provete, este iria certamente empenar.

Outro fator, é a colocação de extratores de forma uniformizada em toda a área a extrair. De facto, os extratores devem ser colocados de forma uniforme em toda a cavidade, pois a aplicação de um extrator na parte superior apenas faria com que a parte inferior da peça encalhasse na parte inferior da cavidade moldante ao ser extraída, e assim empenasse.

Em função da sua localização na cavidade moldante, o extrator terá um comprimento diferente. Assim, são necessários 6 extratores, onde todos eles apresentam um diâmetro de 4 mm. Na tabela 3.11 apresentam-se o comprimento dos extratores e as respetivas quantidades de cada.

Tabela 3.11 - Comprimento dos extratores.

Comprimento	Quantidade
77 mm	1
87 mm	1
84,5 mm	2
85mm	2

### 3.3.3 Coquilhadora

A coquilhadora é o sistema que vai permitir manter as meias moldações fechadas durante o vazamento e a solidificação. Para além disso, vai ainda conter um sistema de abertura que permite a extração do fundido de forma mais simples e facilitada com recurso aos extratores. Estes foram descritos no subcapítulo anterior explicando pormenorizadamente os locais onde devem ser aplicados e que cuidados devem ser tidos em conta ao localizá-los na meia moldação. Para além do sistema de abertura, apresenta também um sistema de fecho, onde ambos são acionados a partir de um cilindro hidráulico (este também foi um dos componentes adquiridos antes do início deste trabalho).

Finalmente, é também importante que o conjunto na sua totalidade permita a aplicação de um circuito de arrefecimento, ou seja, que apresente os furos necessários para a passagem de tubagens que arrefecerão a moldação. Na figura 3.18, pode-se ver uma modelação da coquilhadora em questão com a localização assinalada para cada um destes pormenores adicionais.

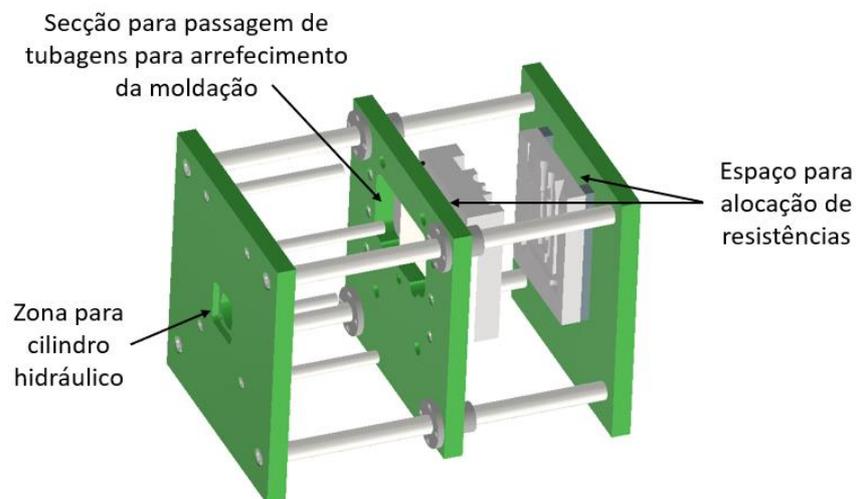


Figura 3.18 - Vista isométrica da modelação da coquilhadora e alguns pormenores importantes.

Assim, a coquilhadora tem um conjunto de 22 itens diferentes, em diferentes quantidades cada um. Segue uma lista de peças necessárias para a sua montagem, na tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Lista de peças da coquilhadora.

Item	Quantidade	Nome da peça	Item	Quantidade	Nome da peça
1	1	Placa de Extratores	12	2	Barra de Apoio Fixa
2	1	Barra de Apoio Móvel	13	1	Placa Molde
3	1	Barra de Apoio Móvel_2	14	4	Screw iso 4762-m10x50-12_9
4	1	Extrator pequeno 87 mm	15	1	Placa Móvel
5	1	Extrator pequeno 84,5 mm	16	6	Screw iso 4762-m12x30-8_8
6	1	Extratores pequenos 77 mm	17	4	Linear_lmef30uu
7	2	Extratores pequenos 85 mm	18	16	Screw iso 4762-m6x25-8_8
8	1	Moldação Grande	19	1	Placa_Cilindro
9	2	Pino Extrator	20	4	Pino Extrator Grande
10	8	Screw iso 4762-m10x40-10_9	21	4	Varão Retificado
11	1	Moldação Pequena	22	8	Screw_iso_4762-m16x50-8_8

### 3.3.4 Moldação com parte em MA

A aplicação de um inserto exige que se modele outra meia moldação, desta vez com uma cavidade para alocar o inserto. Esta cavidade poderá ter diversas formas e não precisa de ser estritamente retangular, contudo deve ser aplicada na meia moldação da figura 3.17 (a) por ser mais larga. Para além disso, pode apresentar uma cavidade com diferentes profundidades, em função da peça a fundir, e de modo que o arrefecimento seja o ideal.

A figura 3.19 (a) apresenta uma cavidade para que seja possível aplicar um inserto produzido pela tecnologia DED, onde se faz a construção diretamente na moldação. No caso de ser aplicada a tecnologia SLM, então seria necessária uma moldação como a da figura 3.19 (b), onde se aplicam duas abas nas laterais do inserto e nelas furos M8 roscados nas quatro extremidades. Assim, é possível garantir que os parafusos não ficam demasiado próximos da cavidade moldante, devido a uma espessura pequena entre a cavidade e o parafuso. Para

além disso, alojando os parafusos mais longe da cavidade evita-se que estes sofram alterações devido às altas temperaturas em que vão estar em contacto perdendo funcionalidade. A existência das abas deve-se ao facto de evitar a construção de mais 10 mm de espessura em cada lado por MA, pois assim, evita-se perder tempo e dinheiro da construção de um volume que é indiferente ser em MA ou em aço maquinado.

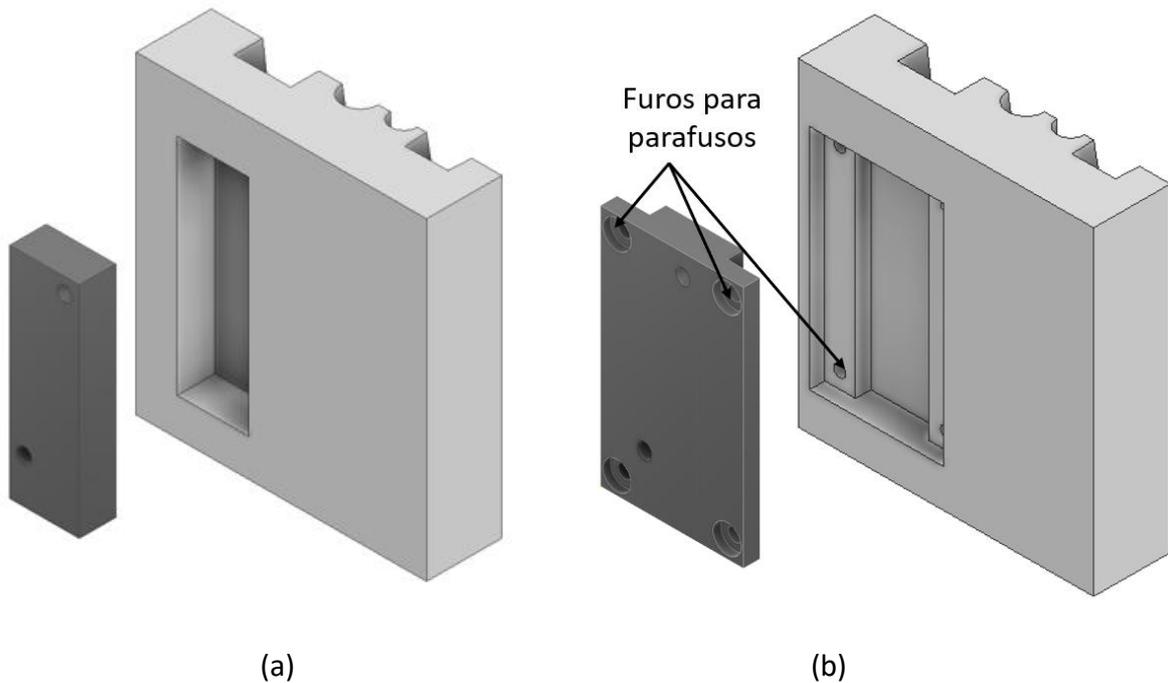


Figura 3.19 - Cavidade para incluir um inserto de MA na moldação.

Como se pode ver estas cavidades apresentam geometrias retangulares, pois são cavidades para ensaios prévios, podendo qualquer inserto/cavidade ter outro tipo de geometria completamente diferente.

Neste caso, as moldações no seu interior apresentam a mesma cavidade moldante, contudo, no lado externo da meia moldação mais larga apresenta-se, então, a cavidade para que seja inserido o inserto.

Para esta segunda situação, existindo agora um arrefecimento localizado devido à existência de canais conformados, é importante compreender como se vai dar o arrefecimento do modelo proposto e as alterações na meia moldação derivadas a um arrefecimento localizado. Isto vai ser estudado no capítulo 4.

Esta moldação vai poder ser utilizada na mesma coquilhadora antes projetada, uma vez que a moldação apresenta as mesmas dimensões e características de aparafusamento que a anterior.

### Inserto

Pensando agora em particular no inserto, é importante compreender como é que o fluido refrigerante vai entrar dentro dele, e de que forma nele pode circular.

De todas as maneiras possíveis para aplicar os canais de arrefecimento, foi concluído que a sua entrada e saída nele deveria ser feita pela face externa do inserto, ou seja, aquela que não está em contacto com nenhuma parte da moldação (ver figura 3.20). Se os canais estivessem em contacto com as faces internas da moldação (representadas na figura 3.20) seria necessário projetar uma forma de entrada do líquido refrigerante pela lateral, e assim complicar todo o projeto.

Aplicando os canais desta forma, o único componente que deverá ter em consideração as tubagens será a placa de extratores. Este componente deve apresentar furos que permitam a passagem das tubagens. Desta forma, não haverá implicações perpendiculares na forma construtiva, nem na montagem do sistema uma vez que a coquilhadora estará preparada com uma abertura que permite a entrada de tubagens facilitando o seu acesso à moldação.

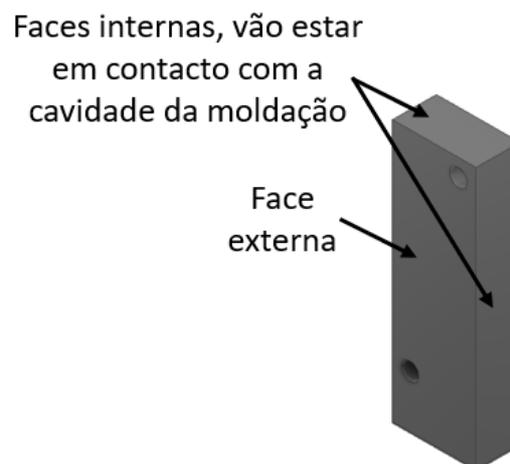


Figura 3.20 - Faces externas e internas à moldação, do inserto.

Na figura 3.21 (a) apresenta-se um possível inserto onde estão representadas a entrada (furo superior) e a saída (furo inferior) do canal de arrefecimento. Em pormenor, na figura 3.21 (b) é possível ver qual o percurso proposto desse mesmo canal. Seria, contudo, possível idealizar outro tipo de inserto, como por exemplo em formato de “escada”, de modo que os canais de arrefecimento percorressem de forma mais aproximada, toda a área da peça em estudo. Isto permitiria que o arrefecimento fosse muito mais controlado e dirigido.

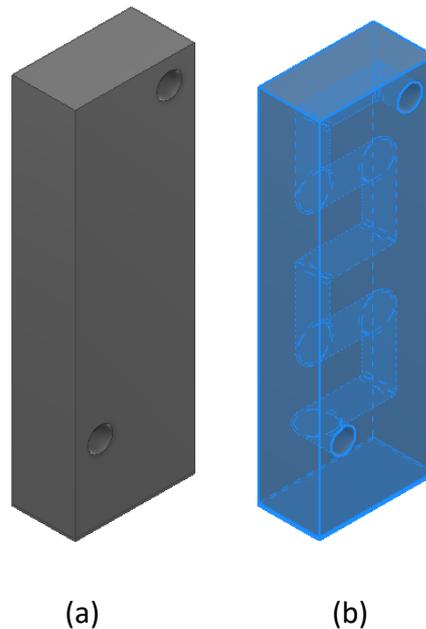


Figura 3.21 - (a) Entrada e saída do canal de arrefecimento pela face externa no inserto; (b) Proposta de canais de arrefecimento no interior do inserto.

### **Conectores entre o inserto e as tubagens do fluido refrigerante**

Como explicado anteriormente, é crucial fazer um bom projeto da unidade de controlo de temperatura e da sua conexão com a moldação de modo que não existam fugas do fluido refrigerante entre os tubos e a entrada na moldação.

Dado que os canais de refrigeração apresentam um diâmetro de 10 mm, segundo o catálogo da *Staubli Connectors*, que permite o uso de qualquer fluido refrigerante, seja ele óleo ou água, os conectores poderão apresentar um diâmetro de 9 mm ou de 12 mm, onde a temperatura poderá variar entre 0 e 300 °C e a pressão de manuseio terá de ser no máximo 12 Bar.

Estes conectores são compostos por uma fêmea e por um macho (no anexo F é possível o modelo 3D de cada um), como se pode ver na figura 3.22.



Figura 3.22 - Modo de utilização dos conectores escolhidos.

Assim, existe o macho que é o que está anexado à moldação (na figura 3.22 é o conector da direita) e a fêmea é o que está ligado à tubagem de circulação de fluido. O macho está incluído na totalidade no interior do inserto da moldação (ver figura 3.23), sendo que está à superfície dele. A aplicação da fêmea, faz com que parte dela entre dentro da moldação, ficando outra parte no exterior com a ligação à tubagem.

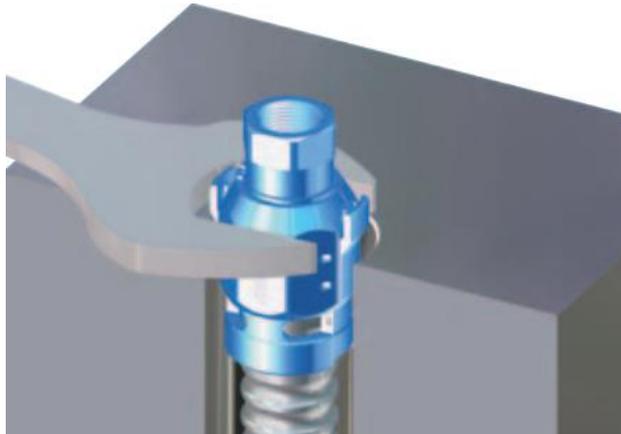


Figura 3.23 - Esboço de uma montagem preliminar dos conectores à moldação.

#### 4. VALIDAÇÃO PRELIMINAR DO CONCEITO

Existindo uma interface entre o inserto e a moldação, esta deve ser estudada de modo experimental e numérico.

Posto isto, é então feita a verificação numérica das moldações que apresentam arrefecimento forçado e das que não apresentam qualquer arrefecimento forçado, com recurso ao *software Quikcast*. Por fim, são expostos os resultados e feitas as comparações entre ambas as moldações e os arrefecimentos.

##### 4.1 Estudo Experimental da Interface entre a Moldação e o Inserto de MA

Para esta aplicação em particular, onde se pretende inserir um inserto de MA para refrigeração de uma moldação, é necessário garantir um bom encaixe entre o inserto de MA e a restante moldação na solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação.

Já na solução 3 - MA (DED) diretamente na moldação - é importante que haja uma boa aderência do metal ao material maquinado durante a impressão. No caso das soluções 3 - MA (DED) diretamente na moldação - e 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação -, em que são implementados insertos feitos por MA na moldação metálica (soluções que vão ser estudadas), é importante caracterizar a transferência de calor na interface. O arrefecimento/aquecimento durante o processo de enchimento e solidificação não poderá ser comprometido pela resistência térmica de contacto (RTC). Caso o seja, estas soluções tornam-se inviáveis.

A resistência térmica de contacto (RTC) existente na moldação é introduzida devido à existência de dois materiais diferentes, que ao serem aproximados vão estar em contacto um com o outro. Contudo, a nível microscópico, apenas os picos da superfície de ambos os materiais estarão em contacto com a outra parte. Quanto maior for o valor da rugosidade, menor será a quantidade de pontos em contacto. Assim, embora apenas seja visível a nível microscópico, existirão pequenas porções de ar entre ambos os materiais formando uma RTC, como se pode ver pela figura 4.24.

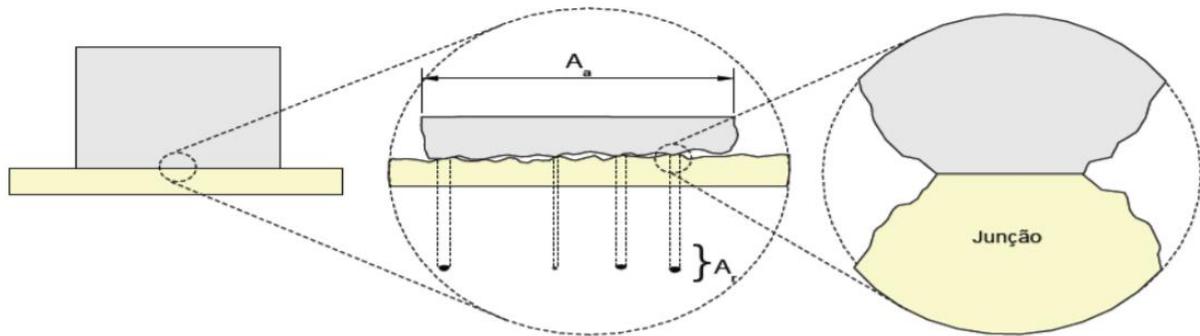


Figura 4.24 - Picos e vales em interfaces [26].

Assim, é importante conhecer o modo como se vai dar a transferência de calor na moldação e qual a pressão que é ótima na interface, de modo que esta seja garantida aquando do ensaio experimental do processo de fundição com a nova solução escolhida.

Para isso, foram feitos alguns testes laboratoriais de modo a ser possível calcular a resistência térmica de contacto (RTC) na zona de transição em ambas as soluções. Inicialmente foi determinada a rugosidade das faces dos provetes que iam estar em contacto com outras faces. O estudo das condições fronteira foi feito, para o material da moldação, com o aço H13 (este material foi o escolhido de entre os materiais sugeridos pela Ramada Aços, como já foi anteriormente explicado) proveniente de um varão, e para o material do inserto de MA, com o aço Maraging, impresso com tecnologia DED no provete maquinado no caso da solução 3 - MA (DED) diretamente na moldação -, e impresso à parte no caso da solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação.

Assim, torna-se importante, do ponto de vista numérico saber o valor da rugosidade nas superfícies da interface a estudar. No seguinte subcapítulo segue esse mesmo cálculo.

#### 4.1.1 Cálculo da rugosidade das superfícies na interface

Com objetivo de estudar a influência da rugosidade na transferência de calor foram feitos ensaios de rugosidade para diferentes graus de polimentos. Fez-se um ensaio sem qualquer polimento, que à partida representa o uso real do inserto de MA e da cavidade, uma vez que estes não vão ser polidos. E fez-se também um segundo ensaio com um polimento em ambas as partes, com uma lixa de granulometria 600 mesh. Isto vai permitir compreender se a transferência de calor é mais eficiente num caso do que no outro.

Neste segundo caso, cada um dos provetes de diâmetro 72 mm, seja de aço H13 ou aço Maraging, recebeu um acabamento superficial igual, gerado por uma lixa de granulometria 600 mesh.

Posteriormente, realizaram-se ensaios de rugosidade para compreender se ambas as superfícies apresentavam uma rugosidade homogênea. Estes foram realizados com o rugosímetro portátil SJ-210 da empresa *Mitutoyo Japão*. O processo iniciou-se com a calibração desse mesmo equipamento, sendo posteriormente posicionada a amostra de forma que o sensor estivesse em contato. Os testes foram realizados de acordo com a norma ISO 1997 e realizado com um intervalo de medição linear de 16 mm e em velocidade constante de 0.25 mm/s.

Quando se iniciou a medição, o sensor pousou sobre a superfície e a unidade de avanço movimentou-se numa trajetória reta. Os testes foram realizados em seis locais diferentes de cada provete, de forma que se verificasse e obtivesse o perfil de rugosidade superficial da peça em diferentes posições. Para cada um desses locais foram realizados dois testes. Os locais e as direções das trajetórias dos testes são mostradas na figura 4.25.

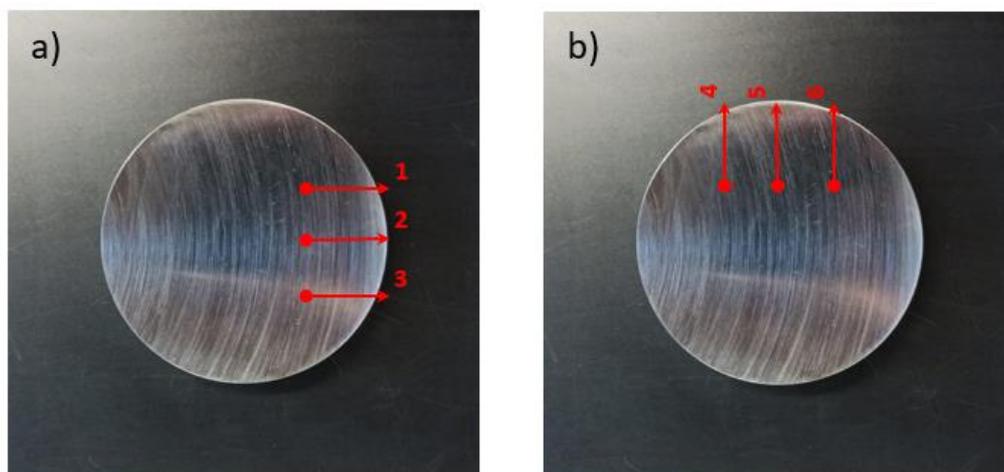


Figura 4.25 - Direções das trajetórias utilizadas no teste de rugosidade.

A tabela 4.13 e 4.14, mostram os valores Ra (rugosidade aritmética) dos diferentes provetes, obtidos através das médias dos valores resultantes dos ensaios de rugosidade.

Tabela 4.13 - Ra dos provetes polidos.

<b>Ra de Provette H13 para impressão [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Ra de Provette de aço H13 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Ra de provete de aço Maraging [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
0,015	0,050	0,050

O mesmo procedimento foi feito para os provetes sem qualquer polimento. Desse procedimento obteve-se os resultados apresentados na tabela 4.14 com os valores das rugosidades aritméticas.

Tabela 4.14 - Ra dos provetes sem polimento.

<b>Ra de Provette H13 para impressão [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Ra de Provette de aço H13 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Ra de provete de aço Maraging [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
1,146	1,146	0,204

Como se pode prever, durante a transferência de calor entre dois corpos, onde um está em contacto com uma fonte quente e a outra está em contacto com uma fonte fria, a existência de ar na interface entre os corpos levará a uma transferência de calor menos eficiente, uma vez que esta não se dá só por condução (transferência de calor mais rápida) mas também por convecção (transferência de calor mais lenta). Assim, na figura 4.26 é possível observar um gráfico daquela que será a distribuição das temperaturas ao longo do comprimento dos provetes a testar em laboratório. A configuração da transferência de calor ao longo dos materiais representa-se por uma reta com declive constante, uma vez que se parte do princípio de que os materiais tenham as mesmas propriedades em todo o corpo e não apresentem mudanças de propriedades.

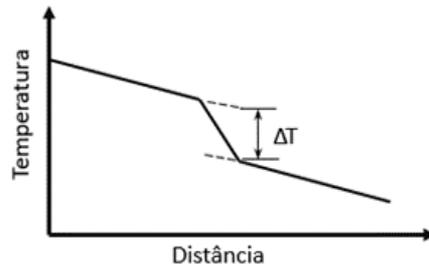


Figura 4.26 - Distribuição da temperatura ao longo de duas superfícies em contacto.

Descreve-se agora de forma sucinta aquele que foi o processo laboratorial para obtenção da RTC de ambas as soluções estudadas (com polimento), considerando para isso diferentes pressões. Com estes testes espera-se obter os valores da resistência térmica de contacto para cada pressão, nas diferentes soluções estudadas. Posto isto, estes valores servirão de *input* numa posterior simulação numérica de vazamento do fundido, para a validação numérica da nova moldação, garantindo assim que a transferência de calor simulada seja a mais próxima do real.

#### 4.1.2 Ensaios Experimentais de Transferência de Calor

Os provetes maquinados foram perfurados em 3 locais diferenciados entre si de 120 °, radialmente e em 3 alturas diferentes de provete, como se pode ver na figura 4.27. Assim, torna-se possível posicionar os termopares no decorrer das experiências. Os provetes de aço Maraging, por serem fabricados por MA permitiram que fossem impressos diretamente com os orifícios.

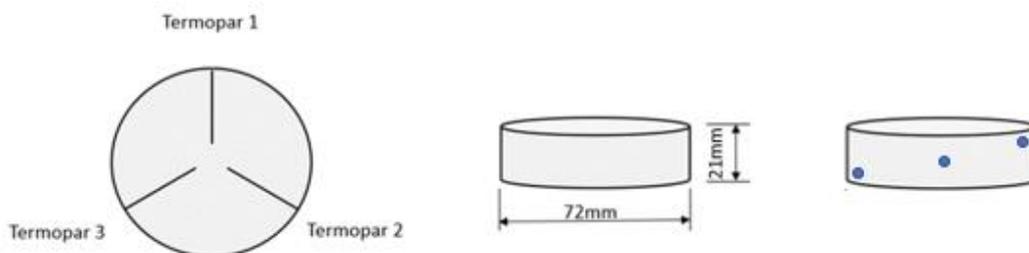


Figura 4.27 - Posicionamento dos termopares e dimensão dos provetes de aço.

Preparados os provetes, iniciaram-se os testes à transferência de calor tendo em consideração quatro pressões de contacto diferentes para cada solução (0, 50, 75, 100 Bar). Estas pressões foram reguladas através do manómetro de pressão presente no equipamento utilizado. Assim, torna-se também possível compreender a influencia da pressão nas peças produzidas por MA. Todos os testes foram realizados no intervalo de temperaturas entre 200 a 350 °C, temperaturas essas que serão as utilizadas durante o processo de fundição.

Na figura 4.28 é apresentado um esquema do equipamento utilizado para a realização dos ensaios e a respetiva imagem real do mesmo.

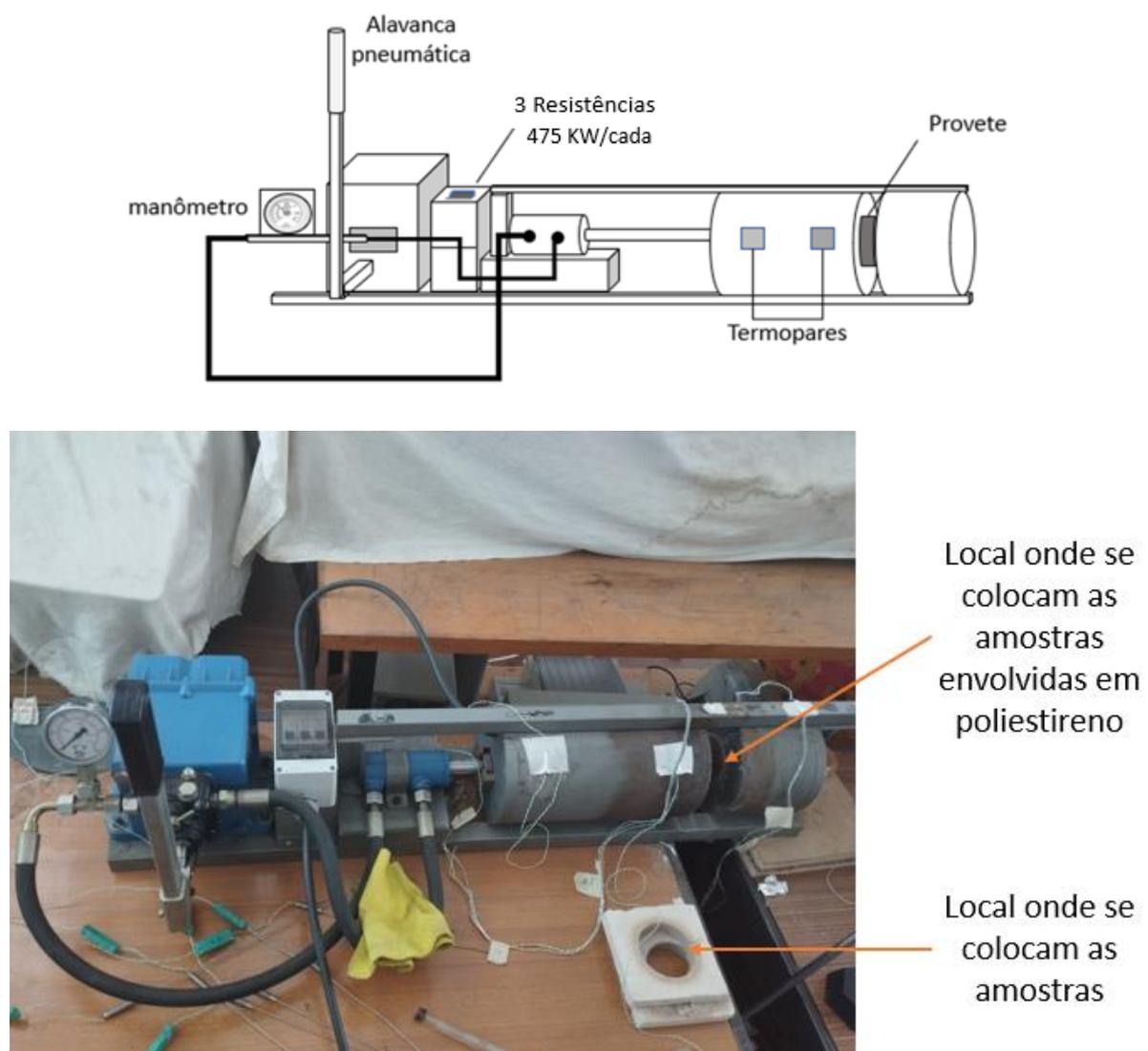


Figura 4.28 - Equipamento de transferência de calor. O poliestireno serve de isolador térmico entre as amostras e o meio ambiente, garantindo que as temperaturas obtidas não sejam influenciadas por esse fator.

Este equipamento é composto por um manómetro de pressão que monitoriza a pressão de aperto, uma alavanca pneumática que junta e afasta os provetes, três resistências que têm uma potência de 475 W cada, estando dispostas em torno de um cilindro de cobre. Todo este conjunto encontra-se isolado termicamente por lã de rocha para minimizar as perdas de calor. Também integram esse equipamento os termopares, os provetes e um sistema de arrefecimento (a extremidade oposta funciona como uma fonte fria, arrefecida por um caudal de água). O cilindro de cobre é movido por um cilindro hidráulico acionado, que garante a pressão de contacto constante entre o cilindro de cobre e os metais durante o ensaio. Todo o conjunto está protegido por uma estrutura de aço.

Sendo este sistema, um sistema aberto, embora as resistências apresentem um fluxo de calor de entrada  $Q_e$ , impresso pelos 475 W por resistência, parte deste fluxo acaba por ser perdido para o ambiente,  $Q_o$ . Assim, o fluxo de calor que chegará de uma extremidade à outra dos provetes será o calor de entrada sem o calor que se perdeu, sendo este o calor efetivo  $Q_f$ . Mostra-se, seguidamente, a figura 4.29 com uma representação esquemática do processo de transferência de calor e a equação 4.1 característica deste processo.

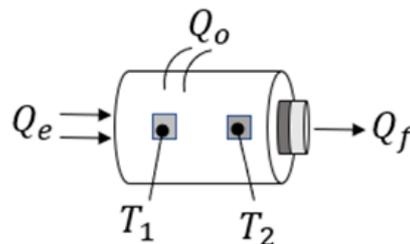


Figura 4.29 - Fluxo de calor do sistema.

$$Q_f = Q_e - Q_o \quad (4.1)$$

Conhecido o fluxo de calor efetivo e a variação de temperaturas lidas nos termopares dos provetes, é possível calcular a condutância térmica de contacto,  $h_c$ , através da equação 4.2.

$$h_c = \frac{Q_f}{A \Delta T} \quad (4.2)$$

$Q_f$  é a taxa de transferência de calor efetiva,  $A$  é a área de contacto aparente e  $\Delta T$  é o diferencial de temperatura que ocorre na interface.

A condutância térmica de contacto relaciona-se com RTC através da equação 4.3.

$$RTC = \frac{1}{h_c} = \frac{\Delta T}{Q_f/A} \quad (4.3)$$

Ou seja, a resistência térmica de contacto é o inverso da condutância térmica de contacto. O conceito de resistência térmica de contacto serve como meio para explicar o efeito da interface na transferência de calor. Ou seja, quanto maior for a condutância térmica de contacto, menor é o valor da resistência na interface.

#### 4.1.3 Cálculo da RTC – Resistência Térmica de Contacto

Antes de calcular a RTC é necessário compreender que tipo de transferência de calor se tem na interface, se se trata de um regime laminar ou turbulento. Assim, calculou-se o número de Rayleigh ( $Ra$ ) com recurso à equação 4.4.

$$Ra = Pr \times Gr \quad (4.4)$$

Onde  $Pr$  é o número de Prantl e  $Gr$  o número de Grashoff.

O cálculo de  $Pr$ , de  $Gr$ , bem como o número de  $Ra$ , permitem compreender que tipo de escoamento (laminar ou turbulento) existe e consequentemente, qual a correlação aplicável. O número de Prantl representa o quociente entre a difusidade de momento e a difusidade térmica, sendo por isso uma medida relativa do transporte da energia de difusão pelas camadas limites hidrodinâmica e térmica. Este é obtido através da equação 4.5.

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k} \quad (4.5)$$

Sendo,  $C_p$  a capacidade calorífica (J/Kg.K),  $\mu$  a viscosidade dinâmica (Pa.s) e  $k$  a condutividade térmica (W/m.K).

Utilizando os valores tabelados de algumas propriedades do ar mostradas na figura 4.30 é então possível calcular o número de Prantl.

Temperatura, T (°C)	20
Massa Volúmica, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1,204
Viscosidade dinâmica, $\mu$ (Pa.s)	$1,8 \times 10^{-5}$
Viscosidade cinemática, $\nu$ (m.s <sup>2</sup> )	$1,51 \times 10^{-5}$
Condutividade térmica, k [W/(m.K)]	0,02564
Capacidade calorífica, Cp [J/(Kg.K)]	1004,8
Coefficiente volumétrico de expansão, $\beta$ (1/k)	$3,41 \times 10^{-3}$

Figura 4.30 - Tabela com as propriedades do ar a 20 °C e 101 KPa.

$$Pr = \frac{1004,8 \times 1,8 \times 10^{-5}}{0,02564} = 0,705 \quad (4.6)$$

A relação entre as forças viscosas, inércia e forças de impulsão associadas à convecção natural é dada pelo número de Grashof, que se pode calcular através da equação 4.7.

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T \rho^2 d^3}{\mu^2} \quad (4.7)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\beta$  o Coeficiente de expansão volumétrico,  $\Delta T$  Variação da temperatura ( $T_{sup} - T_{amb}$  (°C)),  $\rho$  Massa específica,  $d$  Diâmetro do cilindro e  $\mu$  Viscosidade dinâmica.

Assim, o número de Grashof é o seguinte.

$$Gr = 75873110,88 \quad (4.8)$$

Resultando assim no número de Ra, representado na equação 4.9.

$$Ra = 53520726,7 \quad (4.9)$$

Como o valor de Ra se encontra entre  $10^3$  e  $10^9$  de acordo com a tabela 4.15 de equações simplificadas para o ar, deduz-se que o regime será laminar.

Tabela 4.15 - Equações simplificadas para o ar entra -20 °C e 250 °C.

Tipo de superfície	Pr.Gr	Correlação (h, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	Regime
Cilindros horizontais (d<0,2 m)	10 <sup>3</sup> -10 <sup>9</sup>	$h=1,32(\Delta T/d)^{0,25}$	Laminar
	>10 <sup>9</sup>	$h=1,24(\Delta T)^{0,33}$	Turbulento
Placas Verticais ou Cilindros Verticais	10 <sup>4</sup> -10 <sup>9</sup>	$h=1,42(\Delta T/L)^{0,25}$	Laminar
	>10 <sup>9</sup>	$h=1,31(\Delta T)^{0,33}$	Turbulento
Placas Horizontais	a) Face quente virada para cima, ou face fria virada para baixo	10 <sup>5</sup> -2.10 <sup>7</sup>	Laminar
		2.10 <sup>7</sup> -3.10 <sup>10</sup>	Turbulento
	b) Face quente virada para baixo ou face fria virada para cima	3.10 <sup>5</sup> -3.10 <sup>10</sup>	Laminar/ Turbulento

$\Delta T = T_p - T_a$                       L= comprimento ou altura (m)                      d=diâmetro externo

Assim, pode-se calcular o coeficiente de convecção natural ( $h$ ) através da equação 4.10.

$$h = 1,32 \times \left[ \frac{\Delta T}{d} \right]^{0,25} \Leftrightarrow h = 1,32 \times \left[ \frac{108,164 - 23,974}{0,17} \right]^{0,25} = 6,227 (W/m^2C) \quad (4.10)$$

Obtido o valor de  $h$  vai-se então calcular as perdas de calor por convecção do ensaio. Com a convecção natural é possível calcular as perdas de calor por convecção, para o exterior ao longo cilindro metálico.

$$Q_{perdas} = h A (T_{sup} - T_{amb})$$

$$Q_{perdas} = 6,227 \times 2\pi \times 0,085 \times 0,29(108,164 - 23,974) = 81,196 W \quad (4.11)$$

Através da equação 4.12 é possível obter o calor efetivo através da diferença entre a potência elétrica fornecida e o calor perdido para o exterior. Cada uma das resistências utilizadas experimentalmente fornece 475 W de potência ao sistema.

Assim,

$$Q_{efetivo} = P_{fornecida} - Q_{perdas}$$

$$Q_{efetivo} = 393,80 W \quad (4.12)$$

Conhecido o valor de  $Q_f$  (calor que chega à superfície que está a ser arrefecida e permite fazer o cálculo da RTC através da equação 4.3) resta passar à verificação da variação da temperatura ao longo dos provetes, para posteriormente proceder ao cálculo da RTC.

## 4.2 Estudo Numérico da Interface entre a Moldação e o Inserto de MA

Ao longo deste subcapítulo serão estudadas as interfaces quer da solução 3- MA (DED) diretamente na moldação -, quer da solução 4 - Inserto em MA fixo com parafusos à moldação -, de forma numérica.

### 4.2.1 Simulação da transferência de calor para a solução 3

De modo a ser possível fazer o cálculo da RTC na interface, foi necessário preparar toda uma simulação que fosse equivalente à experiência realizada. Para isso, recorreu-se ao programa COMSOL. Assim, foram tidos em conta 2 provetes, um de aço H13 e outro de aço Maraging, como se pode ver na figura 4.31. Ambos os provetes foram modelados neste programa com as mesmas dimensões dos provetes utilizados nos ensaios experimentais (72mm x 21mm). Os materiais considerados foram escolhidos na biblioteca do programa em função das características pretendidas.

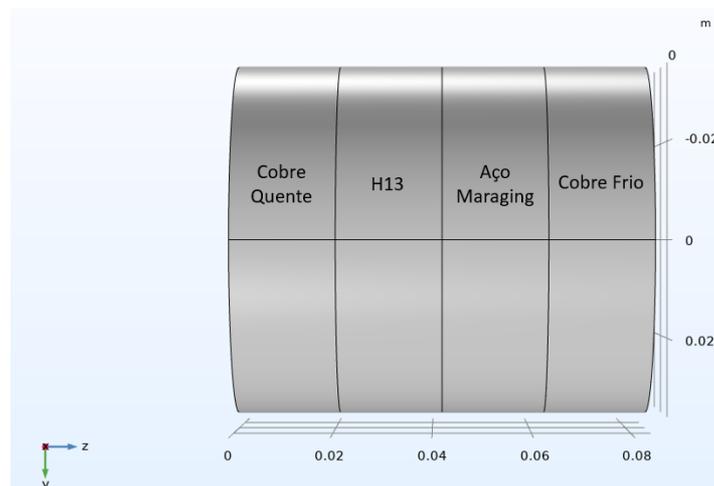


Figura 4.31 - Posicionamento dos provetes na simulação.

Considerando que ambos estavam lado a lado, partilhando uma interface entre si, foram colocados em cada uma das restantes extremidades do provete, provetes de cobre com igual dimensão aos estudados. Foi utilizado o material de cobre, uma vez que as resistências

aquecem este material que vai fazer posteriormente transferência desse calor/frio para os provetes em estudo. Portanto, o estudo consiste em transferir calor de uma fonte quente para os provetes, sendo que esta fonte quente, nas moldações corresponde ao metal líquido a ser vazado e em contacto com a cavidade moldante de aço H13. O provete de cobre encostado ao provete de aço H13 estaria em contacto com uma potência de 475 W. Dado que na realidade existem perdas no sistema, mesmo ele estando isolado, diminuiu-se a potência para 450 W, ajustando a simulação à realidade, uma vez que não existem sistemas isolados na perfeição. Ao lado do provete de aço maraging foi colocado um provete de igual dimensão que faria o seu arrefecimento, contando com um  $h$  de convecção de água no seu interior de  $200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Este provete corresponde ao arrefecimento forçado proveniente dos canais de arrefecimento inseridos no inserto. Todo o sistema foi considerado isolado, incluindo os provetes em estudo. Nas interfaces entre o cobre e os aços, foram consideradas rugosidades de 1 micrómetro. Na interface em estudo (no meio), dado que se trata da solução 3 - MA (DED) diretamente na moldação -, o material é impresso diretamente no provete. Assim, o material depositado vai-se encaixando com maior facilidade nos vales da superfície. Isto vai permitir que a resistência térmica de contacto seja muito inferior do que, por exemplo, na solução 4. Por isso, a rugosidade considerada foi muito baixa, devido à existência muito pouco significativa de ar, sendo 0.0000001 micrómetro. Para além destas condições de fronteira, foram ainda estudadas, tal como nos ensaios experimentais, 4 pressões diferentes (0, 50, 75 e 100 Bar). O provete de cobre a temperaturas frias apresentava-se encastrado, tal como no ensaio experimental, e a pressão era inserida no provete a altas temperaturas.

A malha escolhida para o estudo numérico foi *Free Tetrahedral* uma vez que é o tipo de elemento mais adequado ao estudo em causa, pois a geometria dos elementos pode-se adequar com mais facilidade à geometria dos provetes. Estes elementos, como o próprio nome indica tem 4 faces e 4 nós. Para além disso, os tamanhos dos elementos são “extremamente finos”. Na figura 4.32 é possível ver a malha formada pelos elementos escolhidos.

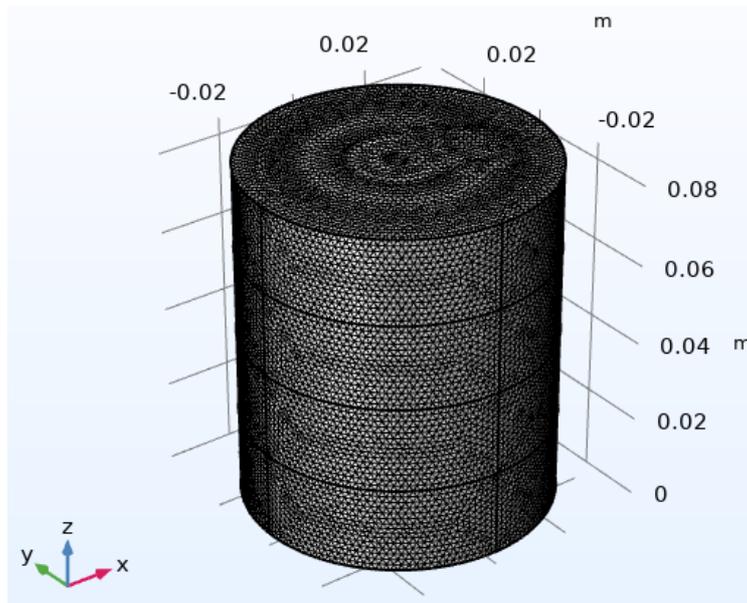


Figura 4.32 – Elementos tetraédricos na malha.

A escolha de elementos “extremamente finos” deve-se ao facto de assim se poder obter uma simulação o mais otimizada possível face ao ensaio experimental.

Simulado o estudo, foram comparadas as temperaturas dos resultados da simulação com as temperaturas dos resultados experimentais. Estas temperaturas foram obtidas para as cotas onde foram tiradas as temperaturas com recurso a termopares no ensaio experimental. Para além desses valores, foi também possível calcular a diferença de temperatura na interface com recurso ao software utilizado, obtendo assim valores mais exatos do que os experimentais. É possível ver na figura 4.33 as alturas dos provetes em que foram obtidos esses valores (0.025, 0.0315, 0.038, 0.046, 0.0525, 0.059 m).

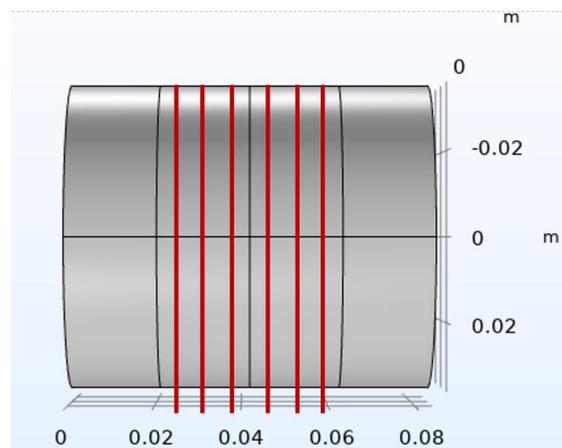


Figura 4.33 - Cotas de extração de temperaturas numéricas.

#### 4.2.2 Simulação da Transferência de Calor da Solução 4

A solução 4 foi pensada de modo a ser aplicada através do uso de parafusos entre a moldação e o inserto. O que leva ao estudo de uma outra variável que deve ser tida em conta durante a simulação numérica: a pressão de contacto. De modo a ser possível calcular a RTC para esta solução, foi realizado um estudo numérico igual ao anterior para as mesmas quatro pressões, no mesmo programa. Neste caso, as pressões estudadas representam a pressão que os parafusos farão sobre o inserto. É sabido que quanta maior a pressão, maior será a área em contacto na interface, uma vez que a força exercida levará à deformação dos picos da superfície.

Neste caso, todo o estudo é igual ao anterior à exceção da rugosidade na interface entre os materiais H13 e Maraging, uma vez que neste caso apenas se encontram encostados. Para esta solução foram simuladas as rugosidades dos provetes polidos com uma granulometria de 600 micrómetros e também a rugosidade real medida. Assim, as rugosidades na superfície que foram testadas foram de 0.05 micrómetros, para o caso dos provetes polidos e de 0.675 micrómetros para o caso das rugosidades de fabrico. Estes valores representam a média das rugosidades na interface entre os provetes, que estão mencionados no subcapítulo 4.1.1.

Tal como no estudo anterior, foram obtidas as temperaturas para as mesmas cotas e otimizadas as curvas numéricas, aproximando-as às obtidas experimentalmente. Finalmente obteve-se diretamente do software a diferença de temperatura tal como no estudo anterior. Como não foi feito ensaio experimental para as rugosidades reais a serem utilizadas na moldação, que são as de fabrico, apenas se fará um estudo numérico com objetivo de comparar as RTC entre superfícies polidas e não polidas. Posto isto, foram obtidas as temperaturas na interface, calculando a sua diferença para posteriormente ser usada no cálculo de  $h$  e da RTC. Também neste caso foi obtido o valor de  $Q/A$ .

### 4.3 Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da interface

#### 4.3.1 Resultado da transferência de calor na solução 3

Nos ensaios experimentais, obtiveram-se para vários instantes de tempo (segundos), através do sistema de aquisição de dados *National Instruments*, um conjunto de valores de temperatura dos diferentes termopares colocados na área quente, na fria e nos provetes. Estes valores foram tabelados com recurso ao *software Excel* e permitiu a obtenção de uma

curva de temperaturas em função da distância das amostras de ambos os metais. Com a regressão linear obtida a partir dessa curva, obteve-se uma equação que representa a transferência de calor ao longo do provete de aço H13 e depois no aço Maraging. Seria espectável, para ambas as soluções, que com estas equações fosse possível calcular o  $h$  na interface. Contudo, devido aos declives dessas equações na solução 3, as diferenças de temperatura na interface dão resultados negativos (ou seja, estas equações dizem que na interface, a temperatura da superfície do segundo provete – T2 - é superior à temperatura na superfície do primeiro provete – T1, contrariamente ao que na realidade acontece – ver figura 4.34). Pode-se ver na figura 4.34, o gráfico seguinte, as regressões lineares e respetivas equações para a pressão de 0 Bar. O mesmo acontece para as restantes pressões.

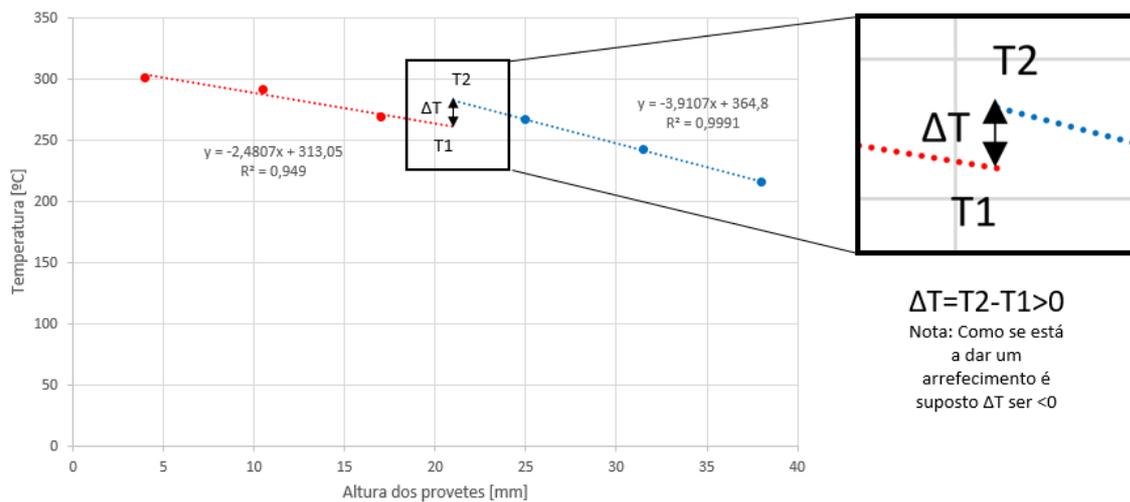


Figura 4.34 - Gráfico das diferenças de temperatura na interface, segundo as equações de regressão linear obtidas em Excel para a solução 3.

Na realidade, como as temperaturas medidas através do provete se encontram a 4 mm para cada lado da interface, é normal que o declive da reta não seja preciso o suficiente. E por isso, é natural que dê valores inesperados relativamente à variação da temperatura na interface. O ideal para a correta medição das temperaturas, e conseqüente correta obtenção de resultados, seria que se obtivessem mais temperaturas, em mais pontos, e mais próximos entre si. Neste caso, a realização de uma simulação é crucial para que se faça o cálculo do erro entre os valores experimentais e os valores numéricos.

Portanto, o cálculo de  $h$  foi realizado considerando o módulo da diferença de temperatura, calculando posteriormente a RTC para a solução 3.

Recolhidos os valores das temperaturas ao longo dos provetes no ensaio experimental, torna-se possível calcular  $h_c$  com recurso à equação 4.2 anteriormente mencionada, bem como a RTC. Repetindo estes cálculos para todas as pressões testadas nos ensaios, na tabela 4.16 com os valores experimentais obtidos de  $h$  e da respetiva RTC, para a solução 3.

Tabela 4.16 - Valores Experimentais obtidos de  $h$  e da RTC de ambas as soluções.

Solução 3		
Pressão	$h$ [W/m <sup>2</sup> *K]	RTC [m <sup>2</sup> *K/W]
0Bar	26160,26	3,82E-05
50Bar	21417,24	4,67E-05
75Bar	22414,92	4,46E-05
100[Bar]	23400,79	4,27E-05

As temperaturas numéricas obtidas foram comparadas com as experimentais e otimizadas até se obterem temperaturas próximas das reais. Obtidas curvas semelhantes e com diferenças de temperaturas pequenas para as seis cotas em estudo, foram obtidas também as temperaturas em cada um dos lados da interface entre os materiais H13 e Maraging, e calculada a diferença de temperatura para fazer o posterior cálculo de  $h$ . Também com recurso ao programa utilizado, foi possível obter o valor de  $Q/A$ , que era igual em ambos os lados da interface. Assim, recorrendo à equação 4.3, tornou-se exequível o cálculo da RTC para as quatro pressões em estudo.

Na solução 3, as temperaturas mostraram-se iguais tanto de um lado da interface como do outro, pois as rugosidades, sendo tão pequenas e próximas de 0, otimizam a transferência de calor. Por isso, a RTC, para as quatro pressões estudadas, é zero.

Contudo, a aplicação de uma pressão superior melhorou a transferência de calor, apresentando curvas com temperaturas cada vez mais baixas. Segue a figura 4.35 com um gráfico que representa a diminuição das curvas de temperatura com o aumento da pressão.

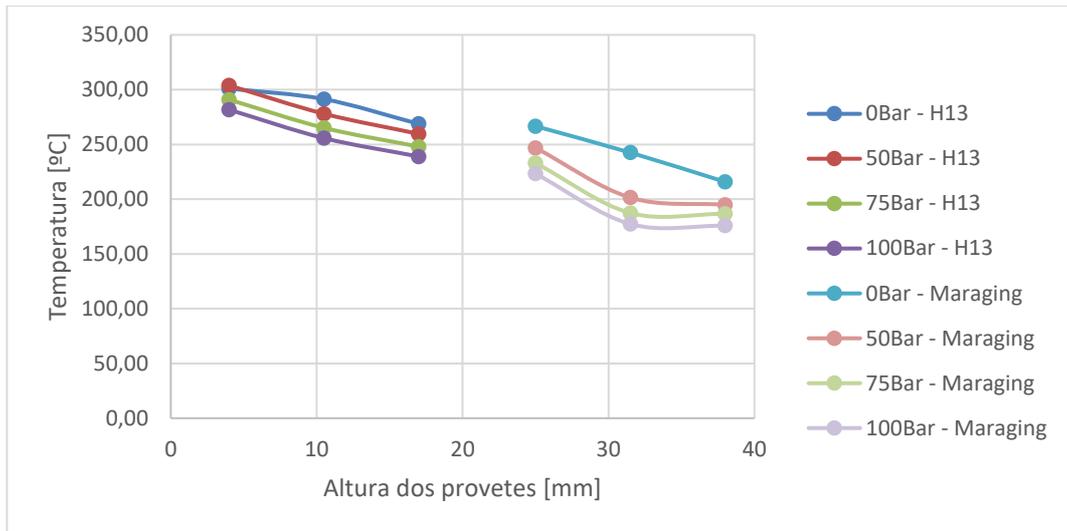


Figura 4.35 - Curvas de temperatura com o aumento da pressão.

Pode-se, portanto, ver, que esta solução, ao nível do arrefecimento é ótima. Mostra-se seguidamente a figura 4.36 que representa a curva da transferência de calor na interface, entre o provete de aço H13 e aço Maraging. Esta curva de transferência de calor não segue a curva prevista na figura 4.26. Pois, neste caso, a RTC não existe.

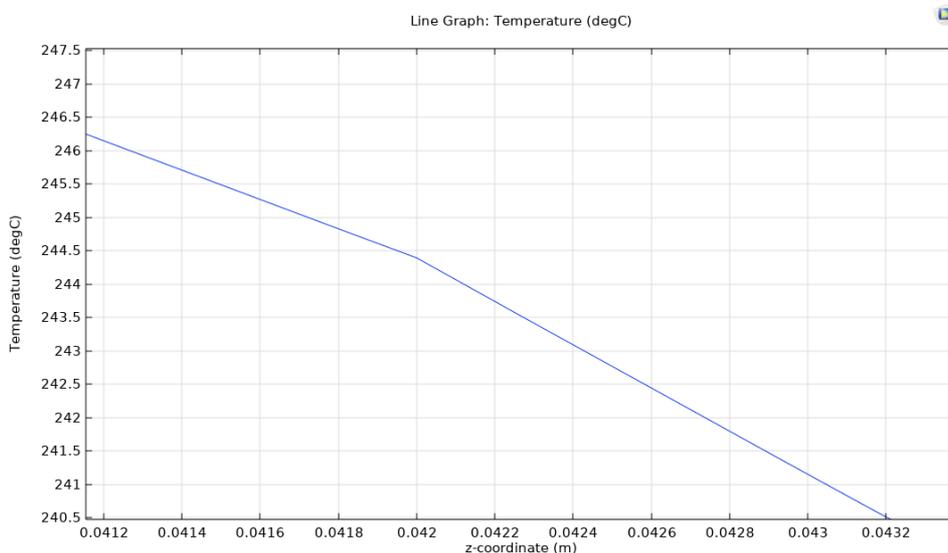


Figura 4.36 - Transferência de calor na interface entre o aço H13 e o aço Maraging e representação da variação (inexistente) de Temperatura devido à RTC.

#### 4.3.2 Estudo da transferência de calor na solução 4

Para a solução 4, as diferenças de temperatura geradas pelas regressões lineares foram positivas, permitindo o cálculo de  $h$ . Também neste caso foram recolhidos os valores das temperaturas ao longo dos provetes no ensaio experimental, tornando-se possível calcular  $h_c$  com recurso à equação 4.5, bem como a RTC. Repetindo estes cálculos para todas as pressões testadas nos ensaios, segue a tabela 4.17 com os valores experimentais obtidos de  $h$  e da respetiva RTC, para a solução 4. Estes testes foram feitos apenas para provetes com as superfícies polidas. Sendo que a transferência de calor com rugosidades de fabrico foi apenas estudada numericamente.

Tabela 4.17 - Resultados experimentais de  $h$  e de RTC para a solução 4.

Solução 4		
Pressão	$h$ [W/m <sup>2</sup> *K]	RTC[m <sup>2</sup> *K/W]
0Bar	4395,27	2,28E-04
50Bar	4574,49	2,19E-04
75Bar	5142,14	1,94E-04
100Bar	6790,69	1,47E-04

Calculado o valor experimental de  $h$  e da RTC, foi realizada a simulação numérica considerando as superfícies polidas. Isto permitiu a comparação de valores numéricos com os experimentais, e calcular posteriormente o erro associado a esse valor experimental. Para além disso, foi realizada simulação para a rugosidade real, permitindo perceber as verdadeiras diferenças de temperatura que vão existir na moldação e a diferença entre a transferência de calor entre superfícies polidas e não polidas.

Na tabela 4.18 apresenta-se os resultados numéricos do cálculo de  $h$ , da RTC e os respetivos erros com os resultados experimentais obtidos relativos à solução 4. Também nela são apresentados os valores de  $h$  e da RTC com uma rugosidade de fabrico.

Tabela 4.18 - Resultados numéricos de  $h_c$ , RTC e respetivo erro com a rugosidade polida e rugosidade real.

	Rugosidade polida			Rugosidade de fabrico	
	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	RTC (m <sup>2</sup> K/W)	Erro relativo (%)	$h$ [W/m <sup>2</sup> *K]	RTC[m <sup>2</sup> *K/W]
<b>0bar</b>	59795,92	1.67x10 <sup>-5</sup>	92,76	9065,69	1,10E-04
<b>50bar</b>	287272,7	3.48x10 <sup>-6</sup>	98,41	46376,81	2,16E-05
<b>75bar</b>	706666,7	1.42x10 <sup>-6</sup>	99,27	62781,37	1,59E-05
<b>100Bar</b>	915714,3	1.09x10 <sup>-6</sup>	99,26	79024,39	1,27E-05

O erro relativo foi calculado pela equação 4.13.

$$E_{relativo} (\%) = \frac{|RTC_{real} - RTC_{numérica}|}{RTC_{real}} \times 100 \quad (4.13)$$

Como se pode ver na tabela 4.18, o erro obtido entre os resultados experimentais e os resultados numéricos são muito elevados. Isto deve-se ao facto de os valores experimentais da temperatura na interface serem dependentes de equações lineares aproximadas a apenas três pontos ao longo de cada provete, sendo que os pontos mais próximos da interface se encontram a 4 mm. Assim, os resultados obtidos experimentalmente são muito vagos e não são próximos da realidade. Com o auxílio do *software COMSOL*, conseguiram-se obter resultados próximos dos reais, pois este tem em consideração equações que são mais exatas relativamente às temperaturas em cada cota dos provetes. Os resultados experimentais estariam mais corretos se houvesse mais pontos em estudo e mais próximos da interface estudada. Assim, os resultados obtidos são os esperados, uma vez que os valores das temperaturas na interface são de difícil cálculo, de forma experimental.

Comparando os resultados de transferência de calor entre superfícies polidas e não polidas, podemos concluir que a transferência de calor é melhor entre superfícies polidas do que nas não polidas e que o aumento de pressão em ambos os casos, melhora a sua transferência de calor. Também é conclusivo que se pode utilizar uma rugosidade de fabrico, e obter-se uma boa transferência de calor, com diferenças de temperatura inferiores a 1 °C, ao aplicar uma pressão de 100 Bar, sendo melhor do que não aplicar qualquer pressão, mas ter superfícies polidas na interface.

Na figura 4.37, está representado um gráfico com a diminuição das RTC em função da pressão, que nos permite concluir que uma pressão ideal seria de 100 Bar, e que uma pressão muito superior a essa acabaria por estabilizar a RTC, não a igualando a zero.

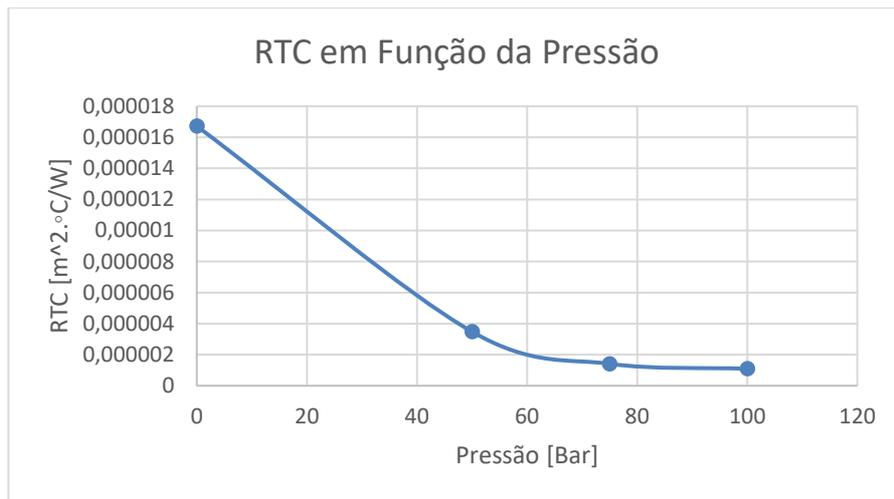


Figura 4.37 - RTC em função da pressão.

Ao contrário do que se verificou na solução anterior, o aumento da pressão não diminui as curvas de temperatura nesta situação, não tendo qualquer influência nesse aspeto. Influencia apenas a RTC.

Mostra-se na figura 4.38, um gráfico com o perfil de temperaturas ao longo da interface entre os provetes, bem como a RTC lá existente, tal como era esperado na figura 4.26.

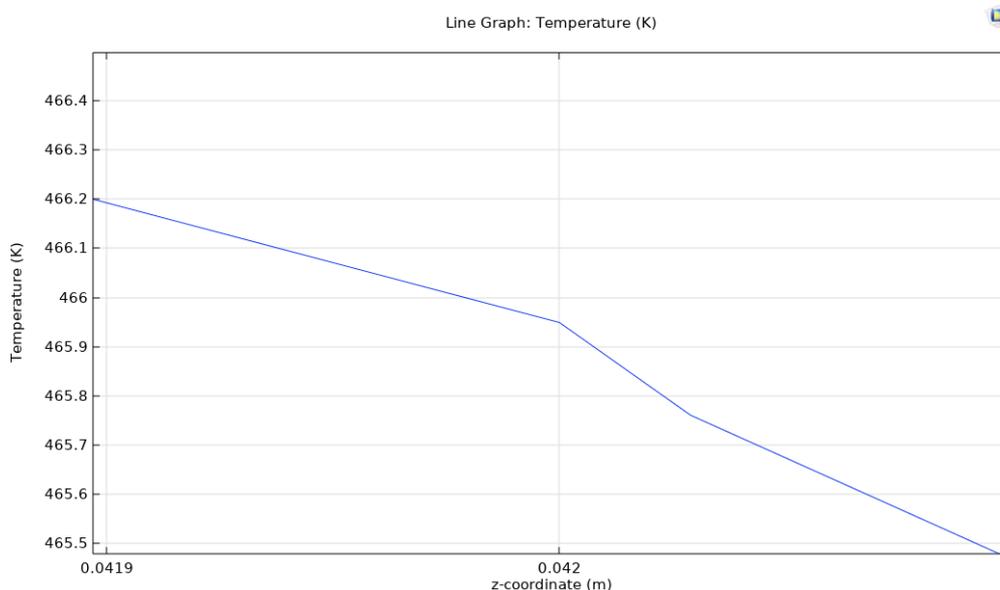


Figura 4.38 - Perfil de temperatura ao longo da interface dos provetes e representação da RTC com uma pressão de 100 Bar em superfícies polidas.

Embora exista nestes casos uma RTC superior à solução 3, a transferência de calor é igualmente eficiente, uma vez que a diferença de temperatura na interface não é superior a 1 °C quando aplicada uma pressão de 100 Bar.

Como se pode ver, tanto no caso da simulação da solução 3 como no caso da solução 4, provou-se que a diferença de temperaturas na interface não vai ser significativa e que por isso, a introdução de um inserto na moldação não vai influenciar de forma negativa a transferência de calor, e o arrefecimento da cavidade da moldação. Por isso, ambas as soluções são viáveis nesse sentido.

#### **4.4 Estudo numérico do vazamento em moldação com e sem arrefecimento**

De forma a compreender a velocidade e o perfil de arrefecimento foram realizadas simulações considerando dois casos de estudo: (i) sistema sem canais de arrefecimento; (ii) sistema com canais de arrefecimento conformados. Estas simulações foram feitas com recurso ao software *Quickcast* num estudo 3D. Neste foram consideradas algumas condições do processo. A temperatura ambiente no exterior da moldação é de 20 °C, e este faz uma convecção normal com o meio ambiente. O enchimento dá-se a 0,1 Kg/s e uma temperatura de vazamento de 700 °C para o material normalmente usado em fundição por gravidade, que é o AlSi7Mg. Considerou-se que a moldação estaria a uma temperatura de 250 °C e que esta seria feita de aço H13, tal como anteriormente previsto. Para além disso, a resistência de contacto existente entre o metal líquido e a moldação é de  $3,3 \times 10^{-3}$  K/W.

De modo a compreender de que forma se dá o arrefecimento foram considerados três pontos no modelo a fundir, situados na peça escolhida com formato de “escada”. Estes estão representados na figura 4.39. Relembrar que os desenhos técnicos da moldação correspondente a este modelo se encontram no anexo E, com as respetivas cotas representadas.

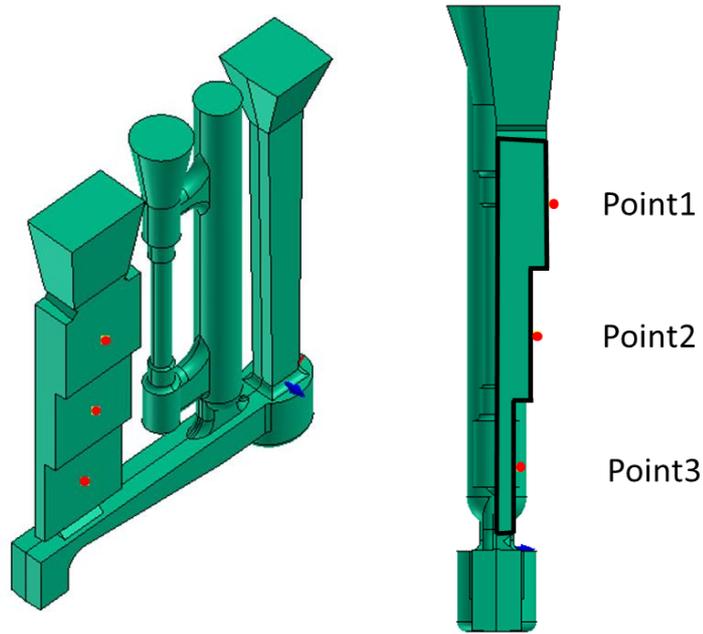


Figura 4.39 - Localização dos pontos onde são avaliadas as temperaturas do fundido.

#### 4.4.1 Validação Numérico da Moldação sem Arrefecimento por MA

Tendo em mente a figura 4.39, considerando então um vazamento sem o uso de canais conformados, tal como acontece no processo de fundição por gravidade atual, pode-se constatar pelo gráfico da figura 4.40 que as temperaturas do ponto 1 atingem máximos de aproximadamente 293 °C. Este ponto tem a sua temperatura máxima inferior aos restantes pontos, uma vez que está em contacto com o meio ambiente. Como também é o último ponto a ter metal líquido, é normal que apenas a partir de 110 segundos (fase final do vazamento), este tenha uma temperatura superior à temperatura do ponto 3, que neste momento já tem o metal a começar a solidificar e, por isso, com temperaturas a diminuir. Por sua vez, o ponto 2 é o que se encontra a temperatura superior durante praticamente todo o tempo de vazamento e solidificação, isto deve-se ao facto de estar entre a “escada” superior e a “escada” inferior, e isso faz com que seja constantemente aquecida. Quando a “escada” inferior está a encher o ponto 2 já está a aquecer, e quando a “escada” superior está a encher, a “escada” do meio já está cheia e sempre a receber novo metal líquido que acabará por encher a última “escada”. Por isso, a sua temperatura só começa a diminuir depois de a cavidade respetiva ao ponto 1 estar completamente cheia, e aí sim, as temperaturas irão começar a diminuir devido à solidificação do metal.

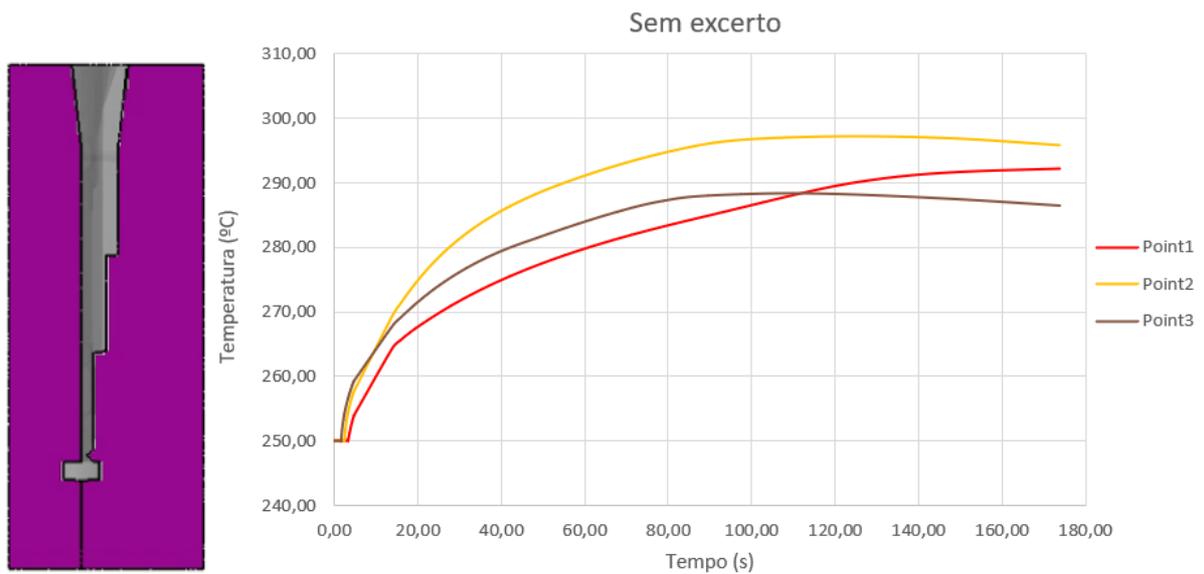


Figura 4.40 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade sem arrefecimento.

#### 4.4.2 Validação Numérica da moldação sem arrefecimento por MA, mas com presença de um inserto em MA de aço Maraging

De modo a compreender o que influencia o arrefecimento do modelo a fundir, foi feito um estudo numérico considerando a mesma moldação, mas que apresentou um inserto, sem qualquer canal de arrefecimento. Isto permite compreender o que a variação de um metal, e da sua presença na moldação faz variar no arrefecimento do metal.

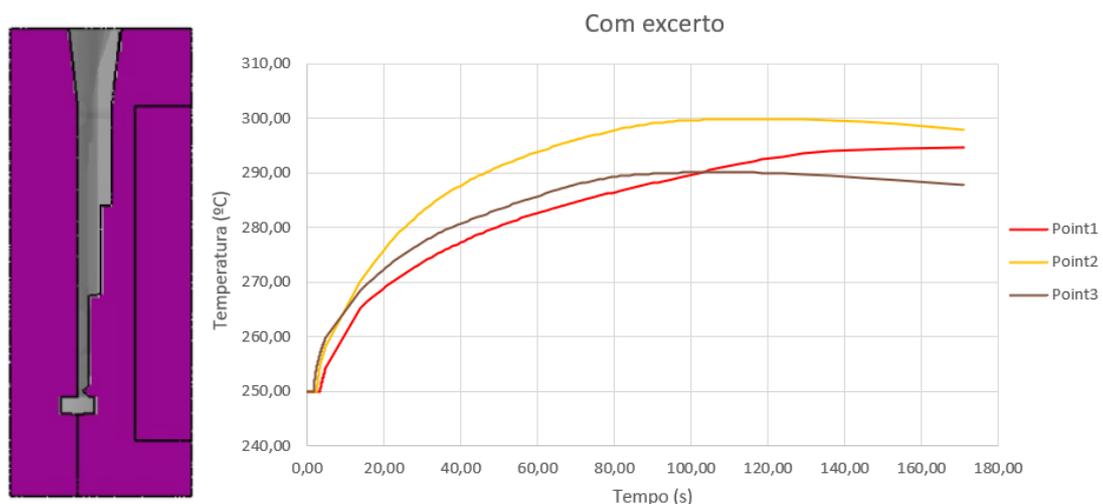


Figura 4.41 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade sem arrefecimento, mas com a presença de um inserto de aço Maraging.

Pelo gráfico da figura 4.41 é possível compreender que as curvas de temperatura, viram a sua temperatura aumentada em 3 °C aproximadamente, ao longo de todo o tempo de enchimento. Isto deve-se ao facto de o inserto ser feito de aço Maraging e apresentar um coeficiente de transferência de calor inferior ao aço H13. Por isso, aumenta a dificuldade em arrefecer a cavidade com a presença de um material que tem uma condutibilidade térmica inferior à da moldação.

#### 4.4.3 Validação Numérica da Moldação com Arrefecimento por MA

Adicionando agora uma outra variável à simulação – a existência de canais de arrefecimento e o arrefecimento a água – vai-se então analisar o gráfico obtido presente na figura 4.42.

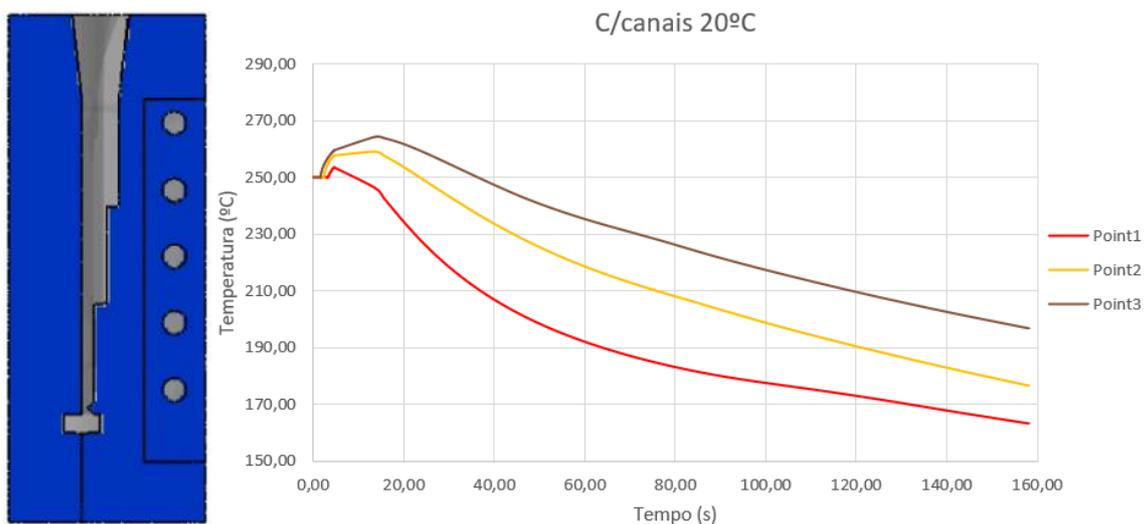


Figura 4.42 - Gráfico com as variações de temperatura ao longo do enchimento da cavidade com uma moldação de fundição por gravidade com a presença de um inserto de aço Maraging e arrefecimento.

Considerando a figura 4.39, o ponto 3 é o que apresenta temperaturas mais altas em todo o enchimento devido ao facto de estar constantemente a ser alimentado com novo metal líquido. Por outro lado, este ponto encontra-se mais distante dos canais de arrefecimento, e por isso é sujeito a um arrefecimento inferior ao ponto 1 e 2. Porém, é importante que este ponto se mantenha a mais altas temperaturas de modo que o metal não arrefeça de imediato na “escada” inferior. Desta forma, pode continuar a alimentar as “escadas” superiores.

O ponto 2, por ser o segundo a ser cheio com metal líquido e por estar a uma distância média dos canais de arrefecimento, encontra-se a uma temperatura inferior ao ponto 3 e superior ao ponto 1.

O ponto 1 por sua vez é o que tem a temperatura mais baixa devido ao facto de estar em contacto constantemente com a temperatura ambiente, ser o último a encher e ao mesmo tempo estar sempre a ser arrefecido devido à circulação de fluido refrigerante.

Note-se que estes canais de arrefecimento podem não ter a geometria ideal uma vez que não foram otimizados, por isso também, a temperatura da moldação em alguns pontos pode estar inferior à desejada. Para que isto não ocorresse seria necessário diminuir o número de canais que passam nas zonas que se encontram mais frias, e caso haja zonas com temperaturas que excedessem as temperaturas ideais, adicionar mais canais de arrefecimento aí.

Estes estudos numéricos permitiram compreender de que forma se vai dar o arrefecimento na cavidade moldante e que variáveis devem ser tidas em conta ao projetar tanto a cavidade moldante como a própria moldação com o inserto de MA. Para além disso, os resultados obtidos sugerem que o uso de canais de arrefecimento conformados arrefece eficazmente a moldação garantindo um arrefecimento dirigido, da zona mais espessa para a mais fina.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Esta dissertação consiste no desenvolvimento de moldações metálicas que apresentem um arrefecimento dirigido devido à presença de canais conformados produzidos por tecnologias de MA.

Começou-se por aprofundar alguns conhecimentos nas áreas de fundição por gravidade, fundição injetada e MA. Foi igualmente necessário idealizar uma forma de fazer interagir os processos de fundição mencionados com tecnologias de MA. Desta idealização surgiram quatro soluções das quais duas provaram ser viáveis: (i) Impressão de MA diretamente na moldação, numa cavidade localizada na zona a arrefecer; (ii) impressão de um inserto de MA a apertar à moldação com recurso a parafusos, também na zona a arrefecer.

Inicialmente foram desenvolvidas e projetadas as diferentes moldações. Em ambas as soluções, se escolheu o aço Maraging para a produção da MA, e o aço H13 para a restante moldação. Para a correta validação destas moldações seria necessário, primeiramente, fazer a análise numérica e experimental das transferências de calor. Numa fase posterior, fazer a validação das moldações numérica e experimentalmente. E por fim, analisar a existência de defeitos nos fundidos.

Para ambas as soluções, foi possível realizar a análise de transferência de calor com sucesso. Fizeram-se diversos testes experimentais de transferência de calor onde se teve o cuidado de avaliar variáveis como a pressão e a rugosidade entre interfaces. Estes testes foram validados com estudos numéricos de transferência de calor no *software COMSOL*. Destes estudos, experimentais e numéricos foi possível concluir que a impressão direta na moldação irá fazer com que a RTC não influencie a transferência de calor. Ficou ainda provado que para o caso do uso de um inserto, aplicando uma pressão de 100 Bar, a RTC também não influenciaria negativamente a transferência de calor, uma vez que as diferenças de temperatura na interface seriam inferiores a 1 °C. Desta forma, concluiu-se que a transferência de calor, em ambos os casos, não foi comprometida.

Quanto à validação das moldações foi possível fazer o seu estudo numérico, tanto sem arrefecimento forçado, como com arrefecimento forçado devido à existência de canais conformados.

Com objetivo de compreender de que modo se daria o arrefecimento na moldação com o uso desta nova tecnologia recorreu-se ao *software Quickcast*. Assim, foi possível compreender a influencia da introdução do aço Maraging na moldação. Este, tendo um coeficiente de transferência de calor inferior ao do aço H13, acaba por ser menos eficaz no arrefecimento natural da moldação. Ainda assim, a aplicação de canais de arrefecimento conformados no seu interior permitiu chegar à conclusão de que esta tecnologia permite efetivamente um arrefecimento localizado e dirigido nas peças vazadas. Sendo assim, o arrefecimento torna-se mais rápido e eficaz.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Não tendo sido possível a concretização da fase experimental, os projetos futuros deverão consistir na análise de ambas as soluções em ambiente laboratorial. Para tal, é necessário fazer a fusão do metal, e vazar nas moldações projetadas. Paralelamente, dever-se-á ter o cuidado de analisar e comparar as temperaturas na cavidade moldante, em particular na peça em estudo, com os resultados numéricos obtidos no *Quickcast*. Desta forma, comparando os resultados experimentais com os resultados numéricos será possível avaliar a diferença entre esses valores e compreender se, de facto, existe um arrefecimento dirigido como inicialmente previsto. Após a fase de vazamento e solidificação, é necessário fazer uma análise às três partes da peça. Isto, para compreender de que forma o arrefecimento dirigido melhorou a existência de defeitos na peça. Também será pertinente fazer uma análise à microestrutura da peça e compreender se o seu interior também está livre de defeitos.

Embora a tecnologia de MA seja mais dispendiosa, a aplicação de canais conformados com recurso a esta tecnologia em processos de fundição injetada, poderá reduzir custos de forma significativa, uma vez que as peças produzidas terão menos defeitos e por isso a perda energética de fusão do material será drasticamente diminuída.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Lima, A. Freitas, and P. Magalhães, “Processos de vazamento em moldações permanentes,” Universidade do Porto, Porto, May 2003. Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/62813137/processos-de-vazamento-em-moldacoes-permanentes>
- [2] J. Alberto de Araújo Soares, O. na FEUP, F. Jorge Lino Alves Orientador no INEGI, and R. Jorge de Lemos Neto, “Tratamentos térmicos de ligas de alumínio obtidas por fundição injetada”.
- [3] “Diretrizes de projeto de resfriamento de molde de injeção para núcleo e pino de núcleo - Upmold.” <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [4] Prof.Dr.Cassius O.F.T Ruchert, “LOM 3080 – PROCESSOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA E SIDERÚRGICA.” Universidade de São Paulo.
- [5] “(1577) Fundição por gravidade animação, Gravity die casting animation, animación de fundición por gravedad. - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=v1au2zCKUCA> (accessed Oct. 22, 2022).
- [6] “FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO POR GRAVIDADE (COQUILHA) - PDF Free Download.” <https://docplayer.com.br/37112402-Fundicao-de-aluminio-por-gravidade-coquilha.html> (accessed Oct. 22, 2022).
- [7] “O que é Fundição com Molde Permanente?,” 2017, Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Aula%20%20Fundic%C3%A7%C3%A3o%20por%20Press%C3%A3o/Por%20gravidade%20ou%20coquilhamento.pdf>
- [8] “(1577) FUNDIÇÃO E SOLDAGEM - Aula5: Fundição em Molde Permanente Parte 1: Gravidade - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=4wz2oANfLEg> (accessed Oct. 22, 2022).
- [9] C. Pinto and R. Fernandes, “FUNDIÇÃO EM COQUILHA,” Porto, Jun. 2001. Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available:

- [https://old.foundrygate.com/upload/artigos/Fundi%C3%A7%C3%A3o%20em%20Coquilha.pdf?fbclid=IwAR3nszyS0Snlw4QxJUPc2KF0xuAQ-TVgLqovzqCM03hTS4ZJ-k7mk8Kv\\_VQ](https://old.foundrygate.com/upload/artigos/Fundi%C3%A7%C3%A3o%20em%20Coquilha.pdf?fbclid=IwAR3nszyS0Snlw4QxJUPc2KF0xuAQ-TVgLqovzqCM03hTS4ZJ-k7mk8Kv_VQ)
- [10] “(1577) Fundição sob pressão, animação, Die Casting, Animation, Fundición a precisión, Animación. - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=ETTEc9L-H3s> (accessed Oct. 22, 2022).
- [11] “A Fundição Injectada de Alumínio Princípios e Desafios,” *Ordem dos Engenheiros*.
- [12] L. Nuno and R. Moura, “Fundição Injetada,” Porto, Jun. 2001. Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/fundicao%20injectada.pdf>
- [13] “FUNDIÇÃO EM COQUILHA,” Porto. Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Bibliografia/Apostila%20de%20Fundi%E7%E3o%20por%20Coquilhamento.pdf>
- [14] “Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM | Make.” <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion> (accessed Oct. 22, 2022).
- [15] T. DebRoy et al., “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, Oct. 2017.
- [16] “EOS Metais - Tecnologias em usinagem e manufatura aditiva - AMS Brasil.” <https://amsbrasil.com.br/eos-m/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [17] K. A. S. W. and R. H. S. Cooke, “Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling,” *J. Manuf. Process*, vol. 57, pp. 978–1003, Aug. 2020.
- [18] “Metal 3D Printers LENS Systems - Additive Manufacturing.” <https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/> (accessed Apr. 04, 2021).
- [19] “Sistemas de manufatura aditiva | TRUMPF.” [https://www.trumpf.com/pt\\_PT/produtos/maquinas-sistemas/sistemas-de-manufatura-aditiva/](https://www.trumpf.com/pt_PT/produtos/maquinas-sistemas/sistemas-de-manufatura-aditiva/) (accessed Apr. 04, 2021).
- [20] V. Brøtan, O. Å. Berg, and K. Sørby, “Additive Manufacturing for Enhanced Performance of Molds,” in *Procedia CIRP*, Jan. 2016, vol. 54, pp. 186–190. doi: 10.1016/j.procir.2016.05.074.
- [21] P. J. Oliveira, “*Transmissão de Calor-Convecção Forçada*.” .

- [22] M. Frings, M. Behr, and S. Elgeti, "A simplified simulation model for a HPDC die with conformal cooling channels," *AIP Conf Proc*, vol. 1896, no. 1, p. 170002, Oct. 2017, doi: 10.1063/1.5008200.
- [23] "Aços para Ferramentas de Trabalho a Quente." <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-para-ferramentas-de-trabalho-a-quente.html> (accessed Oct. 22, 2022).
- [24] "Fontes de Erro na medição da Rugosidade - PDF Download grátis." <https://docplayer.com.br/71163573-Fontes-de-erro-na-medicao-da-rugosidade.html> (accessed Oct. 22, 2022).
- [25] J. Fogaça and D. E. Souza, "A IMPORTÂNCIA DO ATRITO E DA TRIBOLOGIA NA ENGENHARIA MECÂNICA".
- [26] "Máquinas de fusão de feixe de elétrons | Máquinas EBM | Aditivo GE." <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines> (accessed Mar. 31, 2021).
- [27] "Metal Materials for 3D Printers and Additive Manufacturing |3D Systems." <https://www.3dsystems.com/materials/metal#nickel-super-alloy-materials> (accessed Apr. 09, 2021).
- [28] "LaserForm 316L (A) | Sistemas 3D." <https://www.3dsystems.com/materials/laserform-stainless-316l?fbclid=IwAR1zqMVgTxGh3Y-OFEo7KtO9vOdIkQfKctd9vnfappaK2G5LKivIRzFi5U> (accessed Jun. 16, 2021).
- [29] "(No Title)." <https://www.metalpowder.sandvik/49f4e1/siteassets/metal-powder/datasheets/osprey-mould-tooling-alloys-am.pdf?fbclid=IwAR1ixnpuLyfh9ZPMVegOHZoCBnA8ID56e-QxLbWhUx3NE5mM5QZZIJX9vqE> (accessed Jun. 16, 2021).

## ANEXO A – EQUIPAMENTOS DA MARCA GE E RESPECTIVAS ESPECIFICAÇÕES

Tabela A.19- Características dos equipamentos da marca Aditivo GE[27].

Características	<i>Arcam EBM Spectra L</i>	<i>Arcam EBM Spectra H</i>	<i>Arcam EBM Q10plus</i>	<i>Arcam EBM Q20plus</i>	<i>Arcam EBM A2X</i>
<b>Potência do feixe de eletrões</b>	4,5W	6kW	3kW	3kW	3kW
<b>Volume da construção</b>	350 x 430 mm (D x A)	250 x 430 mm (Ø / H)	200 x 200 x 180 mm (L x P x A)	350 x 380 mm (Ø / H)	200 x 200 x 380 mm (x, y, z)
<b>Materiais</b>	Arcam EBM Ti6Al4V Grau 5, Material P Arcam EBM Ti6Al4V Grau 23, Material P	Arcam EBM Ti6Al4V grau 5 Arcam EBM TiAl, D- Material Liga 718 de níquel Arcam EBM, material D Arcam EBM Aço Ferramenta Altamente Ligado, Material D	Arcam EBM Ti6Al4V Grau 5, Material P Arcam EBM Ti6Al4V Grau 23, Material P Arcam EBM CoCr, D- Material (Máquina v1.0) Arcam EBM Ti Grau 2, Material D (Máquina v1.0) Arcam EBM Cobre Puro, Material D	Arcam EBM Ti6Al4V Grau 5, Material P Arcam EBM Ti6Al4V Grau 23, Material P	Arcam EBM Ti6Al4V Grau 5, Material P Arcam EBM Ti6Al4V Grau 23, Material P Liga 718 de níquel Arcam EBM, material D Arcam EBM TiAl, D- Material
<b>Observações</b>	O aumento da produtividade reduz o custo por peças, graças ao aumento da velocidade de construção e ao maior volume de construção para empilhar peças de forma compacta Excelente qualidade da peça, com acabamento de superfície e propriedades de material aprimoradas para geometrias de parede fina Arquitetura de sistema integrada, com interface IoT padronizada, análise de dados para monitoramento da integridade da máquina e nova Estação de Recuperação de Pó PRS 30	Maior volume de construção de EBM para materiais de alto calor e propensos a rachaduras Feixe autocalibrado para produção de peças precisas O sistema de manuseio de pó fechado mantém a integridade do lote de pó para produção ideal de peças Escudos térmicos móveis para gerenciamento de temperatura aprimorado Distribuição automatizada de pó e estação de recuperação de pó Aumento de 100% na energia para fornecer compilações até 50% mais rápidas O sistema automatizado reduz a dependência do operador e garante o controlo de qualidade ideal	Alta resolução de peças construídas Pequena pegada Arcam xQAM™ para autocalibração de alta precisão Arcam LayerQam™ para verificação de compilação Manuseio eficiente de pó	Arcam EBM xQam™ para autocalibração de alta precisão Arcam EBM LayerQam™ para controle de qualidade das peças Manuseio eficiente de pó	Plataforma ideal para pesquisa e desenvolvimento de materiais Altas temperaturas de processo Software aberto para desenvolvimento de processos

## ANEXO B - MATERIAIS QUE PODEM SER USADOS NA MA E AS SUAS CARACTERÍSTICAS

Tabela B.20- Características dos materiais que a MA pode usar[28].

Tipo de tecnologia	Material	Densidade	Coefficiente de Dilatação Térmica, 10 <sup>-6</sup> m/m°C	Condutibilidade Térmica, W/mK
SLM	LaserForm® 17-4PH	7,75	0°C:11,6	100°C: 18,3
SLM; DED	LaserForm® 316L (B)	7,95	20-600°C: 19,0	20°C: 15
SLM; DED	LaserForm® 316L (A)	8,0	20-100°C:16,0 20-200°C:16,5 20-300°C:17 20-400°C: 17,5 20-500°C: 18,0 20-600°C: 19,0	0°C:13,29 20°C: 15 100°C:16,2 500°C: 21,4
SLM	LaserForm® AlSi7Mg0.6 (A)	2,67	20-100°C: 21,4	20°C: 120-140
SLM	LaserForm® AlSi10Mg (A)	2,68	20-100°C: 20,9	20°C: 120-130
SLM	LaserForm® AlSi12 (B)	2,69	20-600°C: 20,0	50°C:130-150
SLM	LaserForm® CoCr (B)	8,30	20-600°C: 14,0	20°C: 14
SLM	LaserForm® CoCrF75 (A)	8,35	20-600°C: 14,0	20°C: 14
SLM	LaserForm® Maraging Steel (B)	8,06	20-600°C: 10,0	20°C: 20,9
SLM	LaserForm® Maraging Steel (A)	8,1	0-100°C: 10,0 21-480°C: 10,1	20°C: 14,2 25°C: 20,9 600°C: 21 1300°C:28,6
SLM	LaserForm® Ni625 (A)	8,44	93°C:12,8 538°C:14,0 871°C:15,8	21°C: 9,8
SLM	LaserForm® Ni625 (B)	8,44	20°C: 12,0	20°C: 9,8
SLM	LaserForm® Ni718 (A)	8,2	200°C:13,2 600°C:13,9	21°C: 11,4 100°C: 18,3
SLM	LaserForm® Ti Gr1 (A)	4,51	20-600°C: 7,17	50°C:16
SLM	LaserForm® Ti Gr5 (A)/Ti6Al4V	4,42	20-100°C: 8,6	50°C:6,7
SLM	LaserForm® Ti Gr23 (A)	4,42	20-600°C: 8,6	20°C: 4,2
DED	Aço H13	7,80	20-400°C: 12 20-800°C: 13,9	20°C:24,6 400°C:26,2 800°C:27,6
DED	Ti6242	4,65	20-100°C: 9,4 20-400°C:10,3 20-600°C:10,4	6,9
DED	Titânio cp	4,65	25°C: 8,6	25°C: 21,9
DED	CoCrMo	8,4	12	13
DED	CuSn	8,9	20-300°C: 18,1	120-145
DED	Aço 4340	7,85	20°C: 12,3	44,5
DED	2319 alumínio	2,84	20-100°C: 22,5 20-200°C:23,4 20-600°C:24,4	25°C: 170
DED	4043 alumínio	2,69	20-100°C:22,1	163

## ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO MATERIAL LASERFORM 316L (A)[29]



### LaserForm<sup>®</sup> 316L (A)

Extra low-carbon grade Stainless Steel which is fine-tuned for use with the ProX<sup>®</sup> DMP 320, producing parts with high corrosion resistance and sterilisability. LaserForm 316L (A) yields crack free and completely dense parts for all your applications.

LaserForm 316L (A) is formulated and fine-tuned specifically for 3D Systems DMP 320 metal 3D Printers to deliver highest part quality and best part properties. The print parameter database that 3D Systems provides together with the material has been extensively developed, tested and optimized in 3D Systems' part production facilities that hold the unique expertise of printing 500,000 challenging production parts year over year. Based on over 1000 test samples the below listed part quality data and mechanical properties give you high planning security. And for a 24/7 production 3D Systems' thorough Supplier Quality Management System guarantees consistent, monitored material quality for reliable process results.

#### Material Description

Austenitic stainless steel type LaserForm 316L is the extra low carbon grade of 316. This steel is used as a general purpose material with excellent mechanical and corrosion properties at room temperature. Its chloride resistance makes this specific grade of stainless steel suitable for marine applications. 316L stainless steel is also the preferred material for use in hydrogen atmospheres or for hydrogen piping / cooling applications. Furthermore 316L retains good mechanical properties at sub-zero and even cryogenic temperatures and is suitable for structural components in low-temperature applications.

#### Classification

Parts built with LaserForm 316L alloy have a chemical composition that conforms to the compositional requirements of DIN X2CrNiMo 17-12-2 or Werkstoff Nr. 1.4404.

#### Mechanical Properties<sup>1,3</sup>

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC		U.S.	
		AFTER STRESS RELIEF	FULL ANNEAL	AFTER STRESS RELIEF	FULL ANNEAL
Young's modulus (GPa   ksi)					
Horizontal direction — XY		180 ± 15	180 ± 15	27600 ± 1500	27600 ± 1500
Ultimate Strength (MPa   ksi)	ASTM E8M				
Horizontal direction — XY		660 ± 20	610 ± 30	96 ± 3	89 ± 5
Vertical direction — Z		570 ± 30	540 ± 30	83 ± 5	78 ± 5
Yield strength Rp0.2% (MPa   ksi)	ASTM E8M				
Horizontal direction — XY		530 ± 20	370 ± 30	77 ± 3	54 ± 5
Vertical direction — Z		440 ± 20	320 ± 20	63 ± 3	47 ± 3
Elongation at break (%)	ASTM E8M				
Horizontal direction — XY		39 ± 5	51 ± 5	39 ± 5	51 ± 5
Vertical direction — Z		49 ± 5	66 ± 5	49 ± 5	66 ± 5
Reduction of area (%)	ASTM E8M				
Horizontal direction — XY		65 ± 5	61 ± 5	65 ± 5	61 ± 5
Vertical direction — Z		65 ± 5	62 ± 5	65 ± 5	62 ± 5
Hardness, Rockwell B (HRB)	ASTM E18	90 ± 6	83 ± 4	90 ± 6	83 ± 4
Impact toughness <sup>2</sup> (J/cm <sup>2</sup>   lb.ft)	ASTM E23	215 ± 15	220 ± 15	158 ± 10	162 ± 10

#### Thermal Properties<sup>4</sup>

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Thermal conductivity (W/(m.K)   Btu/(h.ft <sup>2</sup> .°F))	At 20 °C / 68 °F	15	9
Coefficient of Thermal Expansion (µm/m-°C   µin/in-°F)	In the range of 20 - 600°C / 68-1112°F	19.0	10.6
Melting range (°C   °F)		1370-1400	2500-2550

<sup>1</sup> Parts manufactured with standard parameters on a ProX DMP 320, Config B

<sup>2</sup> Tested with Charpy V-notch toughness test, DMV probe

<sup>3</sup> Values based on average and standard deviation

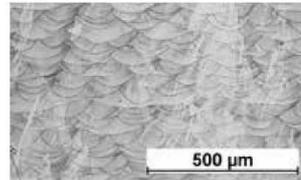
<sup>4</sup> Values based on literature



## LaserForm<sup>®</sup> 316L (A)

### Physical Properties <sup>4</sup>

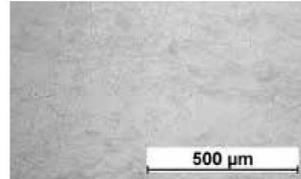
MEASUREMENT	METRIC		U.S.	
	AS BUILT AND AFTER STRESS RELIEF	AFTER FULL ANNEAL	AS BUILT AND AFTER STRESS RELIEF	AFTER FULL ANNEAL
Density — Absolute theoretical <sup>5</sup> (g/cm <sup>3</sup>   lb/in <sup>3</sup> )	8.0		0.286	



Microstructure after stress relief

### Surface Quality

MEASUREMENT	METRIC	U.S.
	SANDBLASTED	SANDBLASTED
Surface Roughness Vertical direction (Z) (μm   μin)	5-10	200-400



Microstructure after full anneal

### Chemical Composition

ELEMENT	% OF WEIGHT
Fe	bal.
Cr	16.50-18.50
Ni	10.00-13.00
C	≤0.030
Mn	≤2.00
Mo	2.00-2.50
N	≤0.11
Si	≤1.00
P	≤0.045
S	≤0.030



[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

©2017 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, ProX and LaserForm are registered trademarks and the 3D Systems logo is a trademark of 3D Systems, Inc.

<sup>4</sup>Values based on literature

## ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO MATERIAL MARAGING[30]



### GENERAL DESCRIPTION

Osprey® mould tooling alloy powders, include maraging steel, stainless steel and hot work tool steel powders. Manufactured by inert gas atomization, using optimised process parameters and equipment designed for Additive Manufacturing, with the option to melt under vacuum for enhanced melt cleanliness and low non-metallic inclusion counts. Alloy powders designed specifically for Additive Manufacturing processes, including Laser & Electron - Beam Powder Bed Fusion, Binder Jet, Direct Energy Deposition and Laser Cladding. Suitable of applications including conformal cooled plastic mould tools and tire mould segments & sipes.

- Maraging steels have low carbon contents, that can be heat treated, to high and ultra-high hardness, without distortion
- Mould tooling stainless steel combines high mechanical strength, hardness and corrosion resistance
- Hot work tool steel suitable for operation at high temperature in die casting applications

### CHEMICAL COMPOSITION (wt %)

#### Osprey® 18Ni300 Maraging Steel

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	Others
<0.03	<0.1	<0.01	<0.01	<0.1	18.0	<0.25	5.0	0.7	9.0	0.10 Al, Bal. Fe

#### Osprey® MAR-60HRC Ultra-High Hardness Maraging Steel

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	Others
<0.03	<0.1	<0.01	<0.01	<0.1	13.0	<0.3	10.0	0.2	15.0	0.10 Al, Bal. Fe

#### Osprey® 420 Stainless Steel

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	Others
0.3	<1.0	<0.04	<0.03	<1.0	-	13.0	-	-	-	Bal. Fe

#### Osprey® H13 Hot Work Tool Steel

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	Others
0.35	0.3	<0.01	<0.01	1.0	-	5.0	1.5	-	-	1.0 V, Bal. Fe

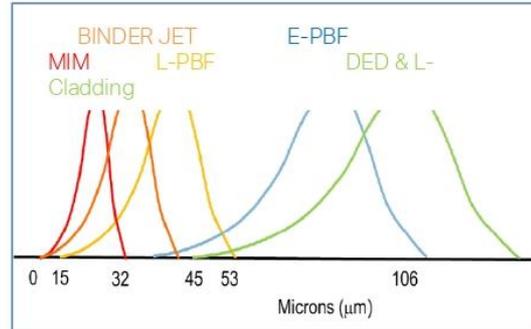
Alloy modifications available by request.

New developments include Cobalt free maraging steels.

## POWDER SIZE DISTRIBUTION

Available in a range of customised powder sizes suitable for different AM platforms:

- Metal Injection Moulding  
< 32 µm, < 22 µm, < 16 µm, < 10 µm & < 5 µm
- Binder Jet  
< 45 µm, < 38 µm, < 22 µm, < 16 µm
- Laser beam - Powder Bed Fusion, (L-PBF)  
e.g. 53 to 15 µm & 45 to 20 µm
- Electron Beam - Powder Bed Fusion, (E-PBF)  
106 to 45 µm
- Direct Energy Deposition (DED) & Laser Cladding  
150 to 53 µm & 90 to 45 µm



Other powder size range distributions are available by request.

## MECHANICAL PROPERTIES

Typical mechanical properties of Osprey® Mould Tooling Alloy powder designed for L-PBF in as built & heat treated condition evaluated at room temperature.

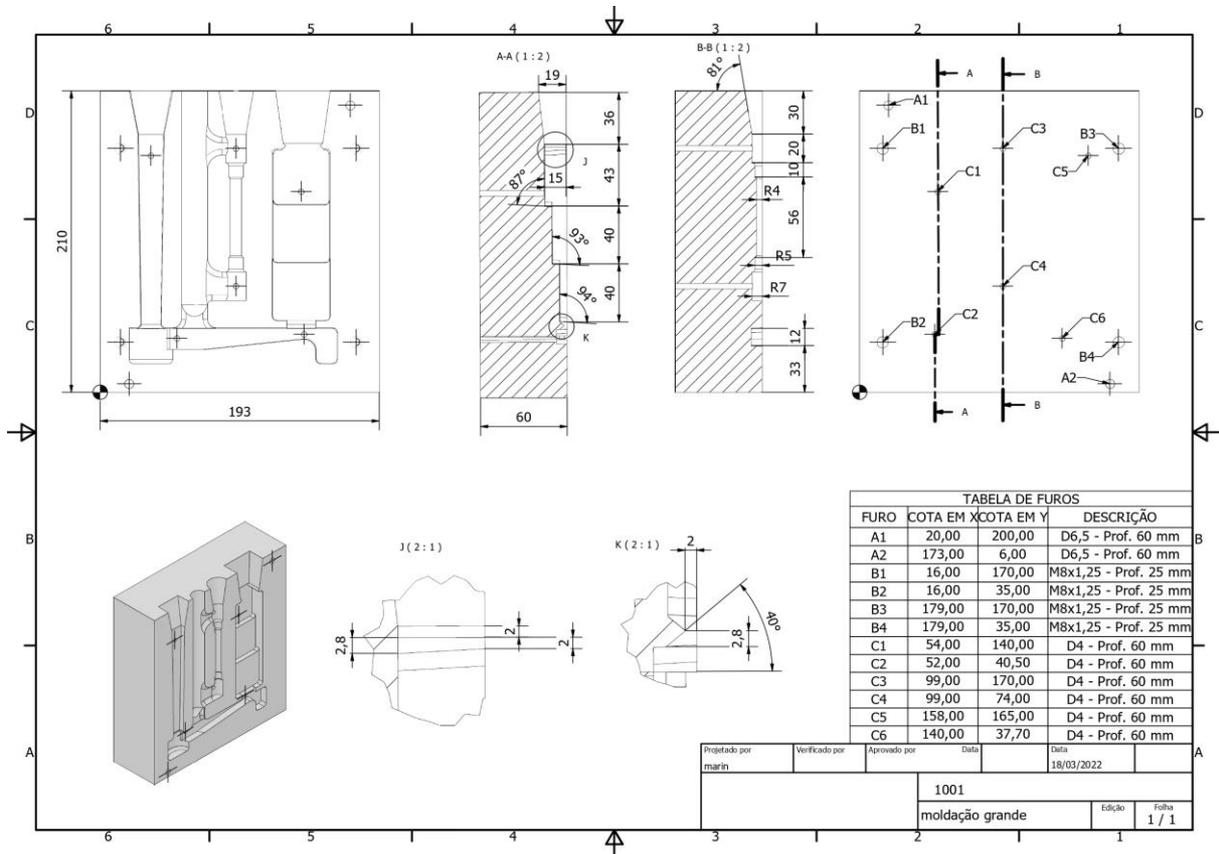
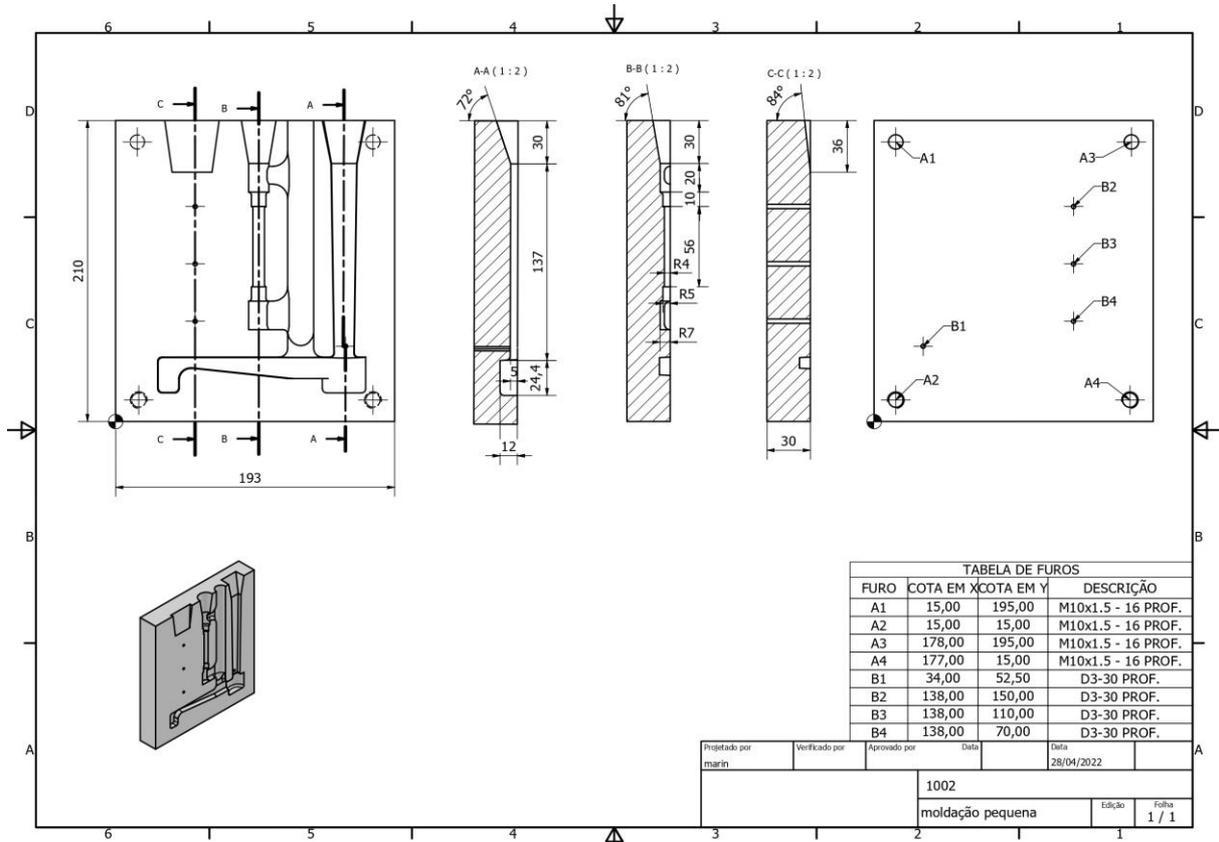
Alloy	Condition	Direction	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hardness
			MPa	MPa	%	HRC
18NI300	As built	Horizontal	960	1176	17.6	39
		Vertical	785	1036	16.6	39
	Heat Treated	Horizontal	2013	2094	5.2	54
		Vertical	1961	2052	7.2	54
MAR-60HRC	As built	Horizontal	1279	1423	16.8	42
		Vertical	1301	1405	16.9	42
	Heat Treated & Optimised	Horizontal	2477	2640	1.8	60
		Horizontal	2142	2350	3.7	57
420	As built	Horizontal	1050	1340	4.0	52
	Heat Treated	Horizontal	1280	1750	9.0	51
H13	Stress Relieved	Horizontal	1750	2000	3.6	54

Disclaimer: Data and recommendations are provided for information and guidance only, and the performance or suitability of the material for specific applications are not warranted or guaranteed. Continuous development may necessitate changes in technical data without notice. This datasheet is only valid for Sandvik materials.

METALPOWDER.SANDVIK



# ANEXO E - DESENHOS TÉCNICOS DA MOLDAÇÃO



## ANEXO F – MODELAÇÕES DOS CONETORES ENTRE O INSERTO DE MA E AS TUBAGENS

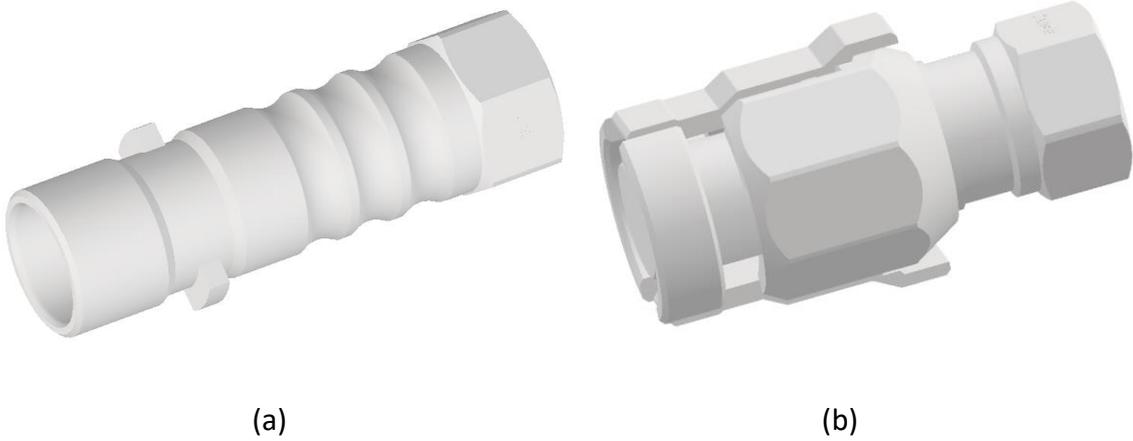


Figura F.43 - Conectores para inserir no inserto para uma boa circulação do fluido refrigerante. (a) macho que se encontra aparafusado no inserto; (b) fêmea que se encontra anexada às tubagens de refrigeração.