



Gonçalo José Martins

**Parametrização global de canais conformais para
melhoria de qualidade durante o processo de
moldação por injeção**



Gonçalo José Martins

Parametrização global de canais conformais para melhoria de qualidade durante o processo de moldação por injeção

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica da Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Associada c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Prof. Doutor Victor Fernando Santos Neto, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio financeiro dos projetos

UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu Desenvolvimento Regional

O júri

Presidente

Doutora Tatiana Vladimirovna Zhiltsova

Investigadora Doutorada (Nível 1) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Pedro Miguel Gonçalves Martinho

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria - Instituto Politécnico de Leiria

Orientadora

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia

Professora Associada c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Mónica Oliveira pelo acompanhamento ao longo desta dissertação, pelos conhecimentos transmitidos e acima de tudo pelos ensinamentos que me passou para o meu futuro enquanto engenheiro.

À Sofia Rocha por toda a ajuda e acompanhamento durante a realização desta dissertação.

Aos meus pais por todos os sacrifícios feitos durante estes anos que permitiram que os três filhos tivessem o orgulho de dizer que têm um curso superior.

Ao Pedro, ao Rui e à Sílvia por apoiarem-me e aconselharem-me da melhor maneira possível neste percurso académico.

Ao meu sobrinho Vicente, por ter vindo alegrar as nossas vidas.

Aos amigos da equipa MotochanicsUA, por todas as oportunidades e por demonstrarem-me que as maiores virtudes de um engenheiro são a sua resiliência e a sua capacidade de adaptação.

Aos amigos do 3Y, por todos os momentos vividos naquele apartamento.

Por último, o meu muito obrigado a todos os amigos e namorada que Aveiro me deu, por acompanharam-me nesta etapa da vida, nos bons e maus momentos.

"Whatever you do in this life, it's not legendary, unless
your friends are there to see it"

B. Stinson

Palavras-chave

Moldação por injeção; Sistema de controlo de temperatura; Canais conformais; Simulação numérica; Estudo paramétrico

Resumo

A moldação por injeção continua ainda a ser o processo preferencial para obtenção de peças poliméricas de elevada precisão dimensional a uma elevada cadência de produção. A elevada procura por peças desta tipologia obriga a um processo de melhoria contínua, tanto no que à produção diz respeito como ao fabrico de moldes e seus sistemas funcionais. Deste modo, quando se atenta na otimização do sistema de controlo de temperatura é possível verificar melhorias na qualidade da peça, minimização do tempo de ciclo, e conseqüente aumento de produtividade. O dimensionamento e otimização deste sistema torna-se deveras complexo e desafiante devido às inúmeras variáveis que condicionam a performance térmica da ferramenta moldante. A análise paramétrica é, portanto, fundamental para entender a influência relativa de parâmetros como: localização do canal, geometria, condições de escoamento, na taxa de extração de calor, permitindo, deste modo, estabelecer diretrizes de auxílio ao projeto térmico de moldes de injeção. Com a presente dissertação torna-se possível verificar, através de estudos numéricos, que o ponto fulcral prende-se com garantir que existe uma dissipação de calor relativamente equilibrada na ferramenta moldante, algo que pode ser conseguido com o recurso a geometrias conformais. Mais ainda, verifica-se que quando associados às geometrias conformais, perfis de secção retangular, resultam em melhor estabilidade dimensional na peça, quando comparados com perfis de secção circular nas mesmas condições de projeto. Este trabalho, para além de apresentar uma alternativa às regras de projeto consideradas, apresenta uma parametrização específica, gerando, assim, um modelo primitivo que estabelece premissas fundamentais para o desenvolvimento de ferramentas automáticas de auxílio ao dimensionamento de sistemas de controlo de temperatura, por forma a que o projeto de canais conformais se torne mais versátil, rápido e uma alternativa viável, em termos de projeto, para a indústria de moldes de injeção de polímeros.

Keywords

Injection molding; Temperature control system, Conformal cooling; Numerical simulation; Parametric study

Abstract

Injection molding is currently the preferred process for obtaining polymeric parts with high dimensional precision at a high production rate. The high demand for parts of this typology requires a process of continuous improvement, both in terms of production and the manufacturing of molds and their functional systems. In this way, when looking at the optimization of the temperature control system, it is possible to observe improvements in the quality of the part, minimization of the cycle time, and consequent increase in productivity. The dimensioning and optimization of this system becomes very complex and challenging due to the numerous variables that condition the thermal performance of the molding tool. Parametric analysis is, therefore, fundamental to understand the relative influence of parameters such as: channel location, geometry, flow conditions, on the heat extraction rate, thus allowing to establish guidelines to aid the thermal design of injection molds. With the present dissertation it becomes possible to verify, through numerical studies, that the key point is to ensure that there is a relatively balanced heat dissipation in the molding tool, something that can be achieved using conformal geometries. Furthermore, it is verified that when associated with conformal geometries, rectangular section profiles, result in better dimensional stability in the part, when compared to circular section profiles under the same design conditions. This work, in addition to presenting an alternative to the considered design rules, presents a specific parameterization, thus generating a primitive model that establishes fundamental premises for the development of automatic tools to aid in the dimensioning of temperature control systems, in order to make the design of a conformal channel more versatile, faster and a viable design alternative for the polymer injection mold industry.

Índice

Nomenclatura	ix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação de estudo e Objetivos	1
1.3 Guia de leitura	2
2 Estado da arte	3
2.1 Análise do estado da arte	3
2.2 Moldação por injeção de matérias plásticas	3
2.3 Molde para injeção de polímeros	4
2.4 Sistema de controlo de temperatura	5
2.4.1 Parâmetros de dimensionamento de canais conformais como sistema de controlo de temperatura	8
2.4.2 Diferentes geometrias implementadas como perfil da secção transversal nos canais do sistema de controlo de temperatura	10
2.4.3 Dimensionamento automático de sistemas de controlo de temperatura conformais	17
2.5 Tecnologias para fabrico de canais conformais	21
2.5.1 SLM – <i>Selective Laser Melting</i>	21
2.6 Síntese de estado da arte	22
2.7 Metodologia de análise	23
3 Materiais e Métodos	25
3.1 Geometria da peça polimérica	25
3.2 Material	26
3.3 Modelação geométrica	27
3.4 Molde	28
3.4.1 Definição do <i>layout</i> e estrutura do molde	28
3.4.2 Máquina de injeção	30
3.4.3 Sistema de injeção	31
3.4.4 Sistema de controlo de temperatura	33
4 Estudo numérico	35
4.1 Domínio de cálculo	36
4.1.1 Peça	36
4.1.2 Molde	38

4.2	Condições de processamento – otimização	41
4.2.1	Definição iterativa das condições de processamento	42
4.2.2	<i>Design of Experiments</i> (DOE) – Método de Taguchi	46
4.3	Arquitetura do sistema de controlo de temperatura	48
4.3.1	Arquitetura convencional	48
4.3.2	Arquitetura conformal – Regras de projeto	50
4.3.3	Arquitetura conformal – Novas propostas	57
4.4	Discussão geral de resultados	66
5	Conclusão e Trabalhos futuros	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Trabalhos futuros	69
	Referências	69
	Anexos	77
A	Ficha técnica material	79
B	Desenho técnico da peça	81
C	Desenho técnico do molde	83
D	Ficha técnica da máquina de injeção	85
E	Unidade valvulada	87
F	Ficha técnica do bico de injeção	89
G	Ficha técnica do Aço AISI P20	91
H	Ficha técnica do AMPCOLOY 940	93
I	Ficha técnica do Aço Maraging 18Ni300	95
J	Gráfico da temperatura ao longo da espessura da peça no estudo de arquitetura convencional	99
K	Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com as regras de projeto de Mayer	101
L	Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com as regras de projeto de Mayer com canal na cavidade	105
M	Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com novas propostas	109

Lista de Tabelas

2.1	Dimensionamento de canais conformais circulares segundo Mayer.	10
2.2	Parâmetros geométricos dos perfis utilizados por Wahab Saidin	13
2.3	Área e perímetro dos perfis com alhetas internas.	15
2.4	Área e perímetro dos perfis com alhetas externas.	16
3.1	Propriedades dos polímeros selecionados	26
3.2	Propriedades gerais SABIC® HDPE CC3054.	27
3.3	Propriedades de material para cálculo da velocidade média de injeção.	31
3.4	Propriedades de material para cálculo da Pressão/Força de injeção.	31
4.1	Condições de processamento do estudo de independência de malha da peça.	37
4.2	Resultados estudo independência de malha da peça.	37
4.3	Resultados estudo independência de malha do molde, tamanho do elemento.	40
4.4	Resultados estudo independência de malha do molde, número de camadas.	40
4.5	Características do domínio de cálculo	42
4.6	Condições de processamento para definição do tempo de ciclo.	42
4.7	Nós e respectivos segmentos para avaliação dos deslocamentos.	44
4.8	Perfis de compactação utilizados no estudo 3 e 4.	45
4.9	Deslocamentos nos segmentos, para definição condições de processamento.	45
4.10	Matriz exponencial L9.	46
4.11	Tabela de estudos L4.	46
4.12	Deslocamentos nos segmentos, otimização das condições de processamento.	47
4.13	Condições de processamento definidas para os estudos.	47
4.14	Características do domínio de cálculo	49
4.15	Resultados gerais do canal convencional com bucha de AMPCOLOY® 940.	49
4.16	Deslocamentos nos segmentos do estudo convencional.	50
4.17	Domínio de cálculo do estudo, canais de conformais de Mayer.	51
4.18	Resultados gerais dos canais conformais de acordo com Mayer.	51
4.19	Resultados de deslocamento dos estudos de Mayer.	51
4.20	Domínio de cálculo dos estudos conformais com canal na cavidade.	53
4.21	Resultados gerais dos canais conformais c/ canal na cavidade.	53
4.22	Resultados de deslocamento dos estudos c/ canal na cavidade.	54
4.23	Nós considerados na análise da temperatura ao longo da espessura da peça.	55
4.24	Constantes para cálculo e respectivas relações de $\frac{P}{D_{c/cc}}$ para os diâmetros considerados.	59
4.25	Domínio de cálculo dos estudos conformais alternativos com canal na cavidade.	60

4.26	Resultados gerais dos canais conformais alternativos com canal na cavidade.	60
4.27	Resultados de deslocamento dos estudos conformais alternativos c/ canal na cavidade e estudos c/ canal cavidade segundo as regras de Mayer. . . .	61
4.28	Domínio de cálculo dos estudos conformais retangulares/quadrangulares com canal na cavidade.	62
4.29	Resultados gerais dos canais conformais retangulares/quadrangulares c/ canal na cavidade.	63
4.30	Resultados de deslocamento dos estudos conformais retangulares/quadrangulares c/ canal na cavidade.	64

Lista de Figuras

2.1	Tempo de ciclo na moldação por injeção	3
2.2	Esquema de máquina de injeção e respetivo molde	4
2.3	Comparação entre canal convencional e conformal	6
2.4	Modelo 3D e vista em corte da peça usada no estudo	7
2.5	Tempo até atingir os requisitos de extração nos casos de estudo	8
2.6	Dimensões de posicionamento de canais circulares	9
2.7	Parâmetros de dimensionamento de canais conformais circulares	11
2.8	Comparação geométrica entre perfil circular e semicircular	12
2.9	Perfis dos canais utilizados no estudo de Wahab Saidin et al.	12
2.10	Variação da distância cavidade-fronteira do canal	12
2.11	Perfis quadrados com alhetas internas	14
2.12	Perfis quadrados com alhetas externas.	15
2.13	Alhetas nos canais do SCT, por Khairu Kamarudin et al.	16
2.14	Perfis utilizados no estudo efetuado por Paulo Freitas et al.	17
2.15	Dimensionamento do SCT através do método de Wang et al.	18
2.16	Estudo comparativo SCT convencional	19
2.17	Secção em corte das configurações utilizadas no estudo de Seo-Hyeon et al.	20
2.18	Estruturas <i>triply periodic minimal surface</i> (TPMS)	20
2.19	Esquema representativo de funcionamento do processo de FSL.	22
3.1	Peça proposta para o estudo.	25
3.2	Plano de partição.	28
3.3	Localização do ataque na peça.	32
4.1	Tamanho do elemento obtido das etapas de <i>Fill+Pack</i> no estudo de independência de malha da peça.	38
4.2	SCT para o estudo de independência de malha do molde.	39
4.3	Disposição do canal conformal.	41
4.4	Resultados em percentagem da camada consolidada da peça.	43
4.5	Representação da localização dos nós considerados.	44
4.6	Disposição do canal convencional na bucha.	49
4.7	Peça dividida em quadrantes relativamente à cota (0,0,45).	52
4.8	Disposição do canal conformal na bucha e convencional na cavidade.	53
4.9	Localização dos nós considerados para a análise da temperatura.	55
4.10	Temperatura ao longo da espessura na peça, nos nós 1 e 4.	56
4.11	Variação de calor em torno do calor.	57
4.12	Coeficiente de transferência de calor para água a 20 °C.	58

4.13	Disposição dos canais adaptado ao processo de FSL.	59
4.14	Configuração dos canais retangulares/quadrangulares.	62
4.15	Velocidade de escoamento nos estudos 4-8-6 e 6@3-8-6.	63
4.16	Temperatura ao longo da espessura da peça para geometrias alternativas nos nós 1 e 4.	65

Abreviaturas

ABS Acrilonitrila butadieno estireno.

AIP[®] Autodesk Inventor Professional[®].

AMDL[®] Autodesk Moldflow Design Link[®].

AMI[®] Autodesk Moldflow Insight[®].

CAD *Computer Aided Design.*

CAE *Computer Aided Engineering.*

DMLS *Direct Metal Laser Sintering.*

DOE *Design of Experiments.*

FEM *Finite Element Method.*

MA Manufactura Aditiva.

MI Moldação por Injeção.

PA6 Poliamida 6.

PC Policarbonato.

PEAD Polietileno de alta densidade.

PP Polipropileno.

SCT Sistema de Controlo de Temperatura.

SLM Selective Laser Melting.

STL *Standard triangle language.*

TPMS *triply periodic minimal surface.*

Nomenclatura

α	difusividade térmica	m^2/s
ΔP	Queda de pressão na cavidade	MPa
ΔD_{4-5-9}	deslocamento relativo nos segmentos do estudo 4-5-9	mm
ΔD_{4-8-6}	deslocamento relativo nos segmentos do estudo 4-8-6	mm
ΔD_{6-12-9}	deslocamento relativo nos segmentos do estudo 6-12-8	mm
ΔD_{6-7-10}	deslocamento relativo nos segmentos do estudo 6-7-10	mm
$\Delta D_{8-16-12}$	deslocamento relativo nos segmentos do estudo 8-16-12	mm
$\Delta D_{\text{convencional}}$	deslocamento relativo nos segmentos do estudo convencional	mm
ΔT	diferença de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{canal}	diferença de temperatura entre a saída e a entrada do canal	$^{\circ}\text{C}$
$\dot{\gamma}$	deformação de corte	$1/\text{s}$
$\dot{Q}_{\text{ambiente}}$	fluxo de calor transferido para o ambiente	W
\dot{Q}_{fluido}	fluxo de calor transferido para o fluido	W
\dot{Q}_{linha}	fluxo de calor transferido por linha	W
\dot{q}_{max}	fluxo de calor máximo	W
\dot{q}_{min}	fluxo de calor mínimo	W
$\dot{Q}_{\text{polímero}}$	fluxo de calor do polímero	W
\dot{V}	caudal volumétrico do fluido de permuta	L/min
η	viscosidade fluido não-Newtoniano	-
λ	condutividade térmica	W/m.K
ν	viscosidade dinâmica do fluido	Pa.s
$\nu_{\text{power law}}$	viscosidade de Power Law	$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$

\bar{v}	velocidade média de escoamento do polímero	m/s
ρ	densidade	kg/m ³
4-5-9	estudo c/ canal D = 4; P = 5; D _{c/cc} = 9 [mm]	-
4-8-6	estudo c/ canal D = 4; P = 8; D _{c/cc} = 6 [mm]	-
6-12-9	estudo c/ canal D = 6; P = 12; D _{c/cc} = 9 [mm]	-
6-7-10	estudo c/ canal D = 6; P = 7; D _{c/cc} = 10 [mm]	-
8-16-12	estudo c/ canal D = 8; P = 16; D _{c/cc} = 12 [mm]	-
A	área	m ²
A _{cavidade projetada}	área projetada da cavidade	m ²
Bi	número de Biot	-
c _{fluido}	calor específico do fluido de permuta	J/(kg·K)
c _{p,polímero}	calor específico do polímero	J/(kg·K)
c _p	calor específico	J/(kg·K)
D	diâmetro do canal	mm
D _{c/cc}	distância entre centro do canal e cavidade	mm
D _h	diâmetro hidráulico	m
D _{min}	diâmetro mínimo de canal	mm
F _{fecho}	força de fecho da máquina de injeção	N
F _f	fator de forma	-
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² ·K
i _p	calor latente de fusão do polímero	kJ/kg
j	diferença entre fluxo de calor máximo e mínimo	%
L	comprimento da planificação da peça	m
m	massa da peça	kg
n	índice de Power Law	Pa·s
P	passo do canal	mm
P _{bombagem}	potência de bombagem	W
P _{cavidade}	pressão na cavidade	Pa
P _{inj}	pressão de injeção	MPa

Q1	quadrante 1	-
Q2	quadrante 2	-
Q3	quadrante 3	-
Q4	quadrante 4	-
Re	número de Reynolds	-
T_{cavidade}	temperatura da superfície da cavidade	°C
t_{ciclo}	tempo de ciclo	s
t_{ciclo}	tempo de processamento	min
$T_{\text{extração}}$	temperatura de extração do polímero	°C
$t_{\text{extração}}$	tempo para a extração	s
T_{fluido}	temperatura do fluido de permuta	°C
$T_{\text{frente escoam}}$	temperatura da frente de escoamento	°C
$T_{\text{fusão}}$	temperatura de fusão do polímero	°C
$T_{\text{molde máx}}$	temperatura máxima do molde	°C
$T_{\text{molde méd}}$	temperatura média do molde	°C
$T_{\text{sup cavidade}}$	temperatura da superfície da cavidade	°C
v	velocidade de escoamento	m/s
w	espessura da peça	m

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente na indústria de moldes de injeção para obtenção de peças poliméricas, a competitividade é muito elevada, pelo que é crucial o desenvolvimento de estratégias para otimizar o processo de modo a reduzir custos materiais e energéticos.

Sendo o processo de Moldação por Injeção (MI) consideravelmente complexo, este exige conhecimentos na área de projeto mecânico e projeto térmico, áreas que quando otimizadas, permitem tornar o processo mais eficiente e conseqüentemente mais lucrativo.

Uma das áreas que carece de maior foco, visto que é a que condiciona mais o processo, é o Sistema de Controlo de Temperatura (SCT) do molde. Os canais conformais surgem como uma solução a médio/longo que representa numa melhoria significativa nos resultados do processo. Inúmeros estudos, utilizando canais conformais como SCT, têm apresentado resultados aliantes, visto que para além de reduzirem consideravelmente o tempo de ciclo garantem a redução de defeitos causados pela heterogeneidade térmica. No entanto, é necessário que seja definida uma metodologia de parametrização de modo a tornar a utilização destes no projeto do sistema de controlo de temperatura de moldes, uma prática corrente na indústria de moldes de injeção.

1.2 Motivação de estudo e Objetivos

O objetivo desta dissertação prende-se com o estudo de estratégias de controlo de temperatura de moldes de injeção, bem como o desenvolvimento de uma metodologia de apoio ao dimensionamento e parametrização no sentido de tornar arquiteturas como canais conformais, uma realidade passível de ser implementada com mais facilidade na indústria de moldes de injeção de polímeros.

Para tal serão utilizadas ferramentas de apoio ao desenho de peça (*Computer Aided Design* (CAD)), desenho de molde e de simulação numérica do processo de obtenção de peças em materiais poliméricos, onde será averiguado, não só, o desempenho dos sistemas de controlo de temperatura, como também as limitações construtivas que estes representem.

1.3 Guia de leitura

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, sendo que se inicia no capítulo 1 - Introdução, onde é feita a contextualização do tema da dissertação apresentada, bem como os objetivos e motivação de estudo. De seguida, e uma vez que num trabalho de investigação é fulcral deter um conhecimento vasto do tema em estudo, realiza-se uma pesquisa bibliográfica.

Desta forma, e tendo por objetivo adquirir este conhecimento, o capítulo que sucede a introdução é o capítulo de Estado de arte, onde é abordado, de um modo geral, o processo de MI e respetivo SCT. Mais detalhadamente, são apresentados diversos estudos presentes na literatura, cujo recurso a canais conformais permitiu obter melhores resultados do ponto de vista de melhoria de qualidade do processo. A geometria do canal foi o parâmetro que mais se teve em consideração. Para além disso, foi possível verificar a existência de diversas lacunas na literatura relativas à definição das condições de processamento estabelecidas para o processo na elaboração do estudo numérico.

No capítulo 3 - Materiais e Métodos, é apresentado o dimensionamento e as considerações tidas em conta para a peça, para o molde e respetivos sistemas inerentes ao processo de MI. O mesmo também aborda os materiais considerados nos respetivos dimensionamentos tendo como base os conhecimentos adquiridos na análise bibliográfica.

O capítulo 4 é dedicado a todo o estudo numérico realizado, onde são abordados diversos temas, sendo que destes se destaca o estudo do domínio de cálculo, o estudo das condições de processamento e a respetiva otimização, utilizando um estudo *Design of Experiments* (DOE) segundo o método de Taguchi. De seguida, o respetivo capítulo é dedicado ao estudo e análise dos resultados de diversos estudos numéricos, cujo objetivo é avaliar diferentes configurações de canais conformais.

No capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos futuros, são apresentadas as diversas conclusões verificadas no desenvolvimento da respetiva dissertação, sendo ainda propostos, no final deste capítulo, os trabalhos futuros, tendo como base as conclusões retiradas.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Análise do estado da arte

A indústria de moldes para matérias poliméricas teve o seu início na década de 1940, sendo que em Portugal, está maioritariamente centralizada nas zonas da Marinha Grande e de Oliveira de Azeméis. Esta indústria desenvolveu-se com a importação de tecnologia estrangeira e, mais tarde, deu início à sua saga exportadora, que ainda se mantém atualmente [1].

O futuro desta indústria está assegurado através do seu desenvolvimento tecnológico, do correto planeamento da produção e controlo de qualidade, da modernização constante dos equipamentos em utilização e do investimento na formação profissional [2].

2.2 Moldação por injeção de matérias plásticas

O processo de MI consiste, como o próprio nome indica, em injetar, para o interior de um molde, material polimérico aquecido a uma determinada temperatura de modo que este preencha um modelo oco da peça que se pretende obter [1]. Este processo, para além de permitir a obtenção de peças poliméricas de elevada qualidade, também assegura uma elevada cadência de produção. Sendo um processo cíclico, o mesmo é caracterizado por 5 etapas, sendo elas respetivamente: plasticização, injeção, compactação, arrefecimento e extração. Destas etapas, o arrefecimento é conhecido por ser a etapa mais preponderante que afeta a produtividade e a qualidade das peças injetadas [3]. Esta representa cerca de 70–80% do tempo de ciclo do processo de injeção, conforme a Figura 2.1 [4].



Figura 2.1: Tempo de ciclo na moldação por injeção, adaptado de [5].

O processo de moldação inicia-se com a preparação da matéria-prima, sendo o polímero aquecido e desumidificado em secadores específicos para a tarefa. Esta etapa é crucial, visto que a existência de água na cavidade moldante irá resultar em defeitos na geometria final da peça.

O polímero é posteriormente transferido para a tremonha, e guiado através de um fuso de passo variável pela câmara de plasticização. É na etapa posterior ao fecho do molde que o fuso é acionado por meios hidráulicos, obrigando o polímero fundido a entrar na cavidade moldante. Após a fase de injeção inicia-se a fase de compactação/pressurização em que a máquina de injeção força mais material fundido a entrar na cavidade, de modo a compensar a contração térmica do polímero durante a etapa de arrefecimento e solidificação da peça. Sucede-se o recuo do fuso, após a solidificação do canal de alimentação e inicia-se a plasticização do material para um novo ciclo. Ainda no molde, decorre a etapa de arrefecimento, havendo uma permuta de calor entre o polímero e o sistema de controlo de temperatura (SCT), sendo que a duração desta está condicionada pela eficácia do respetivo sistema bem como pela geometria e a espessura da peça. Quando o polímero já se encontra à temperatura aconselhada para extração, o molde abre e a peça é extraída por atuadores devidamente dimensionados. Com a extração da peça o molde volta a fechar e inicia-se outro ciclo de injeção. Na Figura 2.2 é apresentado, sob a forma de esquema, a configuração das unidades funcionais principais responsáveis pelas etapas anteriormente descritas.

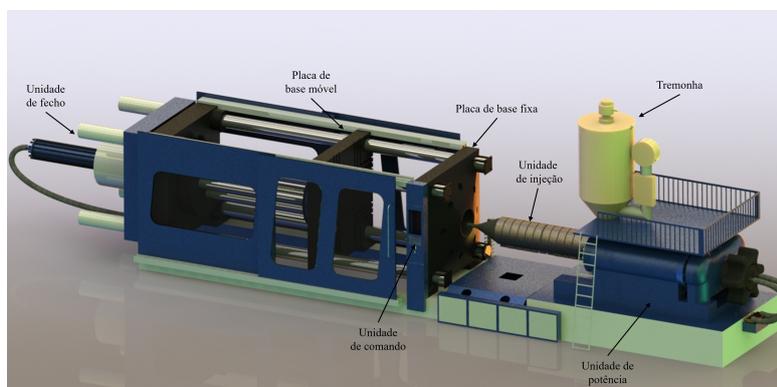


Figura 2.2: Esquema de máquina de injeção e respetivo molde [1].

2.3 Molde para injeção de polímeros

Os moldes de injeção são peças de alta qualidade, fabricadas com a mais alta precisão, pois serão utilizadas na produção em massa de um grande número de componentes [6].

De modo geral o molde tem três funções primárias, a primeira e de mais fácil perceção, é conter o polímero fundido na cavidade de modo aquando este solidificar, tenha-lhe sido conferido a geometria da cavidade. A segunda função, é a transferência de calor do polímero fundido para o material do molde que se apresenta a uma temperatura mais baixa. A terceira função é a extração da peça do molde de uma forma rápida e cíclica [7]. A segunda função no que lhe concerne é crucial, pois esta condiciona a estabilidade dimensional das peças no momento da extração. Como tal, o desempenho térmico do

molde é assegurada pelo SCT, sistema este bastante relevante no processo de MI e que será, por isso, abordado na secção que se segue.

2.4 Sistema de controlo de temperatura

O SCT é extremamente importante para a viabilidade funcional e económica do processo, no entanto, este sistema continua a ser dos que mais carece de desenvolvimento no processo de MI [7].

Sistemas mal dimensionados tem como consequência, maioritariamente, dois resultados indesejados. Primeiro o tempo de arrefecimento é mais longo, reduzindo drasticamente a cadência de produção do processo. Segundo, elevados gradientes de temperatura ao longo do molde que irão comprometer a estabilidade dimensional da peça, pelo que esta apresentará falhas dimensionais e de acabamento superficial, após a extração, o que fará que seja descartada.

O sistema em causa não é exclusivamente utilizado para arrefecimento, este desempenha uma função crucial ao longo de todo o ciclo, durante o processo de injeção e tem como função manter o molde a uma temperatura constante e, de seguida, refrigerá-lo até que a peça polimérica possa ser extraída [7].

Idealmente, na injeção de materiais poliméricos, o molde deveria estar à temperatura do fundido durante a fase de injeção e no momento da extração o molde e as peças deveriam estar à temperatura ambiente [7]. Caso tal se verificasse, a pressão de injeção poderia ser consideravelmente mais baixa e as peças seriam isotrópicas devido ao seu lento arrefecimento, no entanto, de um ponto de vista económico, este cenário seria impensável.

Na MI o processo de transferência de calor é transiente, no entanto, este pode ser assumido como estacionário (temperatura média do molde constante) após alguns ciclos de injeção [8].

A transferência de calor ocorre maioritariamente durante a fase de injeção dado que a diferença de temperatura é elevada, isto é, a diferença de temperatura entre o fundido e a superfície da cavidade do molde é máxima.

Condução, convecção e radiação são os diferentes mecanismos no processo de transferência de calor na MI [8]. O balanço energético na moldação por injeção pode ser descrito pela Equação 2.1. Sendo que $\dot{Q}_{\text{polímero}}$, \dot{Q}_{fluido} , $\dot{Q}_{\text{ambiente}}$, correspondem ao fluxo de calor do polímero, ao fluxo de calor removido pelo fluido de permuta e o fluxo de calor com o ambiente, respetivamente [9].

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} + \dot{Q}_{\text{fluido}} + \dot{Q}_{\text{ambiente}} = 0 \quad (2.1)$$

Experiências demonstraram que 95% do calor é transferido para o molde durante o arrefecimento e este é extraído pelos permutadores do SCT, ou seja, o calor é maioritariamente extraído por processos convectivos [10]. Sendo a percentagem de calor transferida por radiação desprezível, assume-se assim que as paredes do molde são adiabáticas [11]. Deste modo, considera-se que o balanço energético na MI é descrito pela Equação 2.2.

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} + \dot{Q}_{\text{fluido}} = 0 \quad (2.2)$$

Com base na 2.2 conclui-se que o SCT tem de conseguir remover todo o calor do polímero. O projeto de dimensionamento de um SCT, é um processo sequencial, sejam os

canais (permutadores) de carácter convencional ou conformal. Entenda-se por canal convencional, a tipologia de sistema de controlo de temperatura mais utilizada na indústria de moldes de injeção, atualmente, principalmente devido à facilidade de implementação que estes representam, visto que estes são maquinados diretamente no molde junto à parede da cavidade moldante.

No entanto, os sistemas convencionais representam grandes limitações geométricas, essencialmente devido ao modo como são produzidos, como tal, isso é traduzido em défices no desempenho térmico. Já os canais conformais, tal como o nome indica, são canais em que a sua disposição no molde é conformal com a geometria da peça. Para o efeito estes carecem de técnicas de fabrico aditivo ou misto, para serem produzidos. Na Figura 2.3 estão representadas, de um modo genérico, as tipologias descritas anteriormente.

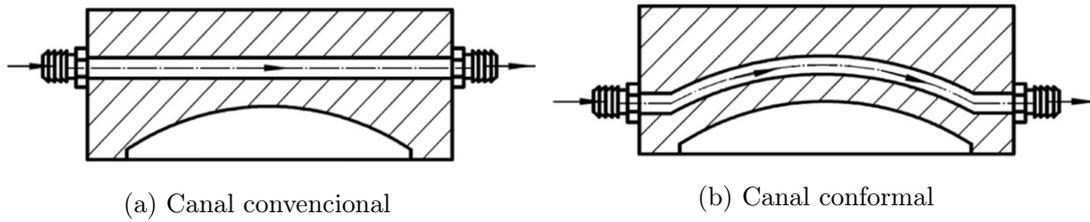


Figura 2.3: Comparação entre canal convencional e conformal [12].

Para o dimensionamento de um SCT recorre-se a diferentes métodos analíticos/empíricos e numéricos. Kazmer [7] sugere que independente do modelo, numérico ou analítico, é necessário realizar as etapas seguidamente descritas.

A primeira etapa do processo de dimensionamento é determinar um valor teórico do tempo mínimo de arrefecimento que uma determinada peça necessita, permanecer no interior do molde, antes ser extraída, para que esta não apresente defeitos. Assim, é necessário fornecer algum critério que indique que a peça apresenta rigidez suficiente para ser extraída [7].

Uma aproximação razoável, é considerar o módulo de elasticidade do polímero em função da temperatura a que o polímero se encontra, visto que este representa a resistência do material ao deslocamento relativo.

A temperatura a que o polímero apresenta uma rigidez significativa é conhecida como temperatura de distorção sob calor (ou como referido da literatura anglo-saxónica *heat distortion temperature*), sendo que a de extração corresponde a 80% deste valor, e esta é, normalmente, encontrada na ficha técnica do polímero fornecida pelo fabricante.

A segunda etapa do dimensionamento é calcular a taxa de transferência de calor que o SCT necessita de remover. Rao et al. [13] apresentaram um modelo analítico/empírico expresso pelas Equações 2.3 e 2.4 que permite calcular a carga térmica do polímero e o calor recebido pelo fluido de permuta. De notar que se trata apenas de um modelo passível de ser utilizado, pelo que existem outros modelos disponíveis na literatura.

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} = 10^{-3} \times [c_p \times (T_{\text{fusão}} - T_{\text{extração}}) + i_p] \times \rho \times \frac{w}{2} \times P \quad (2.3)$$

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} = 10^{-3} \times t_{\text{ciclo}} \times \left(\frac{1}{10^{-3} \times \alpha \times \pi \times D} \right)^{-3} \times D \times (T_{\text{cavidade}} - T_{\text{fluido}}) \quad (2.4)$$

Sabendo a carga térmica que o SCT necessita de remover, bem como a duração que o processo demorará, é possível iniciar o processo de seleção de arquiteturas passíveis de serem implementadas no molde.

Atualmente na indústria de moldes existem inúmeras estratégias que podem ser implementadas como SCT, das quais se destacam os canais maquinados convencionais, os canais conformais, as palhetas (*baffles*), as cascatas (*bubbler*), os pinos térmicos e os insertos de alta condutividade térmica (*e.g.* cobre-níquel). Dada a panóplia de SCT, a escolha da tipologia a utilizar é consideravelmente complexa, pois engloba diversas variáveis relacionadas com a geometria e características da peça e diversos fatores inerentes ao processo, sendo a viabilidade económica do processo um exemplo.

Almeida [3], efetuou inúmeros estudos numéricos no Autodesk Moldflow Insight[®] (AMI[®]) com o intuito de analisar o desempenho de canais conformais comparativamente com outras estratégias de controlo de temperatura em moldes de injeção. Para o efeito, considerou uma peça de geometria simples e de pequena dimensão de modo a reduzir o esforço computacional durante o processamento. O material escolhido para a peça em estudo foi Policarbonato (PC) visto que os requisitos impostos pelo autor seriam assegurados pela utilização deste material. O modelo tridimensional da peça utilizada no estudo encontra-se ilustrado na Figura 2.4.

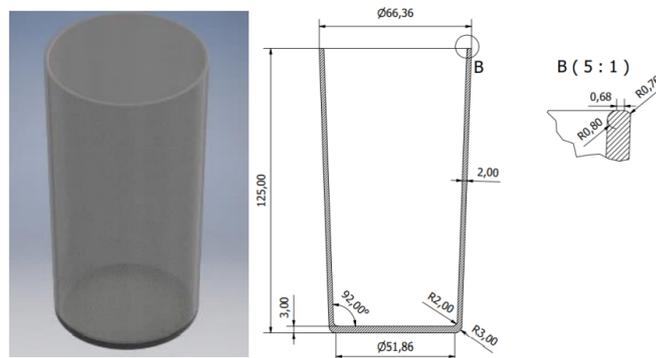


Figura 2.4: Modelo 3D e vista em corte da peça usada no estudo [3].

Relativamente ao SCT, o autor, antes de proceder ao estudo numérico, efetuou uma análise analítica baseada num modelo empírico, semelhante ao apresentado anteriormente, para possibilitar uma melhor perceção dos resultados que iria obter no estudo numérico, que considera ser uma boa prática em qualquer projeto de dimensionamento. Para o estudo das diferentes estratégias de controlo de temperatura foram selecionados sete casos de estudo, sendo eles: um sistema de canais convencionais em ‘Z’, um sistema de lâminas separadoras (palhetas), um sistema com núcleo de refrigeração (cascata), um inserto de alta condutividade (AMPCOLOY[®] 940) sem linha de água interior, um inserto de alta condutividade (AMPCO[®] 940) com linha de água interior e por último um sistema de canais conformais. Para além destes estudos, o autor após a análise de resultados efetuou um novo estudo, otimizando o sistema, através da colocação de um circuito de canais conformais na cavidade.

Esse estudo permitiu ao autor concluir que, no que concerne a redução de tempo de arrefecimento, e consequentemente redução do tempo por ciclo, os resultados mais

promissores correspondem ao sistema de canais conformais otimizados, sendo que estes quando comparados com o sistema de canais convencionais representam uma diminuição de cerca de 84% no tempo de arrefecimento. Na Figura 2.5 estão apresentados os diferentes tempos que a peça necessita para atingir os requisitos de extração.

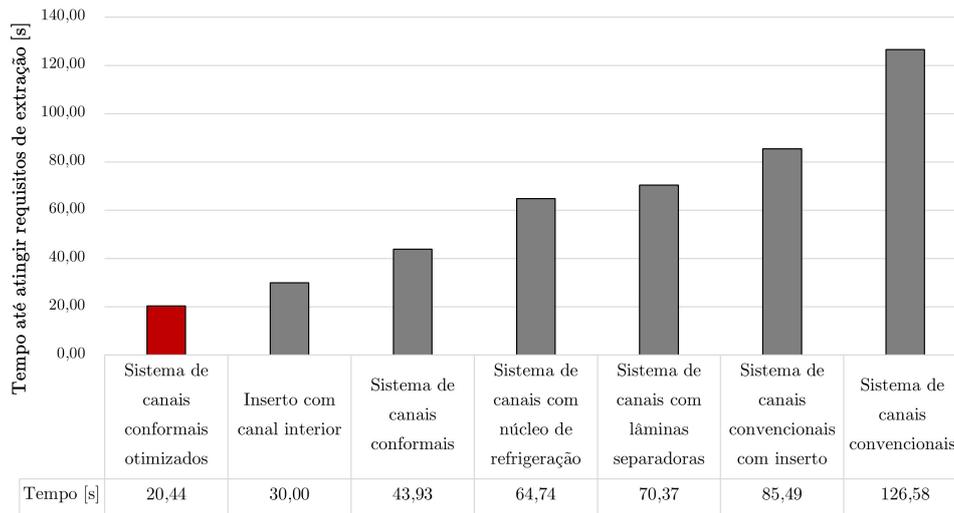


Figura 2.5: Tempo até atingir os requisitos de extração nos casos de estudo [3].

Apesar de os resultados serem bastante promissores no caso dos canais conformais, quando analisados os resultados dos deslocamentos nas peças após a extração, estes revelaram ser o pior sistema nessa categoria. Este facto foi explicado pelo autor devido a diversos parâmetros, sendo que a utilização de canais conformais reduz significativamente a permanência da peça no interior, pelo que o polímero não tem tempo suficiente para que as tensões internas sejam aliviadas. Além disso, utilizando um sistema de canais conformais de configuração em série, faz com que a diferença de temperaturas de entrada e saída do fluido de permuta seja maior, quando comparado com outros sistemas, gerando heterogeneidade térmica na cavidade moldante. Por último o autor salienta a importância da geometria da peça, que neste caso sendo uma impressão profunda a mesma tem maior tendência a sofrer alterações na sua estabilidade dimensional.

A utilização de canais conformais conforme o estudo representa diversas vantagens para melhoria do processo de MI, no entanto, é crucial que os parâmetros inerentes ao SCT estejam devidamente definidos. Pelo que é imperativo efetuar uma análise detalhada à literatura no que concerne as estratégias de SCT conformais.

2.4.1 Parâmetros de dimensionamento de canais conformais como sistema de controlo de temperatura

O artigo mais antigo encontrado sobre a otimização do SCT na MI data o ano de 1969, e este é, provavelmente, o primeiro [14]. Daí em diante, é unânime entre os projetistas que para melhorar o SCT, é necessário encontrar a melhor relação entre a forma, a quantidade e a distribuição dos canais nos moldes de injeção [15]. Além disso, as propriedades termofísicas do fluido, que circula nos canais, desempenham um papel crucial no desempenho térmico do molde.

A transferência de calor por condução pode ser expressa matematicamente pela expressão de Joseph Fourier (Equação 2.5) e a transferência de calor por convecção pode ser expressa pela Lei de Newton (Equação 2.6) [16; 17].

$$\dot{Q} = -k \times A \times \Delta T \quad (2.5)$$

$$\dot{Q} = h \times A \times (T_{\text{cavidade}} - T_{\text{fluido}}) \quad (2.6)$$

Teoricamente, segundo as leis apresentadas, reduzir a distância entre a cavidade moldante e o centro do canal irá promover as trocas de calor, que iria consequentemente reduzir o tempo de ciclo no processo [12].

Apesar de o projetista ter alguma liberdade no projeto de dimensionamento, algumas restrições e limitações devem ser consideradas como regras de projeto de sistemas conformais, *i.e.* restrições geométricas, manufatura, uniformidade da temperatura do fluido de permuta e respetivas quedas de pressão [18].

Segundo algumas regras de projeto, o diâmetro do canal (D), a distância entre a superfície da cavidade e o centro do canal ($D_{c/cc}$) deve corresponder a um valor compreendido entre $1,0 \times D$ e $2,0 \times D$.

O passo ou distância entre canais sucessivos (P), deve ter um valor entre $3,0 \times D$ e $5,0 \times D$ [19].

Os valores apresentados foram estabelecidos para moldes produzidas em aço (ex: AISI P20, AISI S7), pelo que estes devem ser ajustados caso o material utilizado não apresente as mesmas propriedades mecânicas e térmicas do aço.

Na Figura 2.6 é apresentada a disposição que os canais podem apresentar, consoante as restrições apresentadas anteriormente. De notar que estas regras são válidas para o dimensionamento de sistemas de controlo de temperatura convencionais e conformais [20].

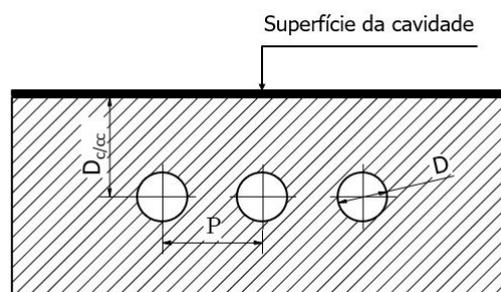


Figura 2.6: Dimensões de posicionamento de canais circulares, adaptado de [19].

O conceito de canal conformal, como referido, define que a geometria do canal deve ser conforme com a geometria da cavidade moldante, no entanto, não é imperativo que $D_{c/cc}$ seja constante ao longo da cavidade, pelo que esta pode ser alterada consoante eventuais concentrações térmicas que possam aparecer na peça [21].

Luh et al. [22] propuseram que os canais conformais não deveriam apresentar uma distância constante relativamente à superfície moldante. Estes devem ser dimensionados tendo como base a diferença de calor na peça plástica após o enchimento. Os autores

defendem esta estratégia tendo como fundamento a ocorrência de zonas quentes, do inglês *hot spots*, em peças poliméricas. Zonas quentes ocorrem normalmente devido a espessuras que não sejam constantes ao longo da peça, ou seja, grandes concentrações de polímero em zonas localizadas [22]. Pelo que o SCT deve ser dimensionado de modo que o calor seja removido não só de uma forma global, mas também localizada.

Conforme indicado anteriormente, a heterogeneidade térmica causa defeitos na estabilidade dimensional nas peças injetadas, como tal, de modo a garantir uma contração uniforme sem qualquer empeno (*warpage*) ou rechupes (*sink marks*), deve ser garantido que no momento da extração a diferença de temperatura na peça plástica não seja superior a 10°C [23; 24].

Além disso, um regime turbulento no interior dos canais é requerido para garantir que o calor é transferido de forma eficiente. Para escoamentos confinados, como é o caso, números de Reynolds superiores a 2300 são requeridos, no entanto, para garantir condições de escoamento turbulento totalmente desenvolvido, o número de Reynolds deverá corresponder a 10000 [16].

Dos inúmeros parâmetros inerentes ao SCT, a geometria da secção do canal, é aquele que tem sido apresentado pela literatura como o mais preponderante no desempenho térmico da ferramenta moldante. Deste modo, será dedicada uma secção meramente à análise de estudos, nos quais foram consideradas diferentes geometrias na secção transversal dos canais.

2.4.2 Diferentes geometrias implementadas como perfil da secção transversal nos canais do sistema de controlo de temperatura

Tal como referido anteriormente, a geometria do canal é apresentada como um dos fatores mais preponderantes no desempenho térmico do molde. O perfil circular é a geometria mais comum no dimensionamento de canais conformais dado que se trata de uma geometria com vantagens na dinâmica de fluidos, visto que as perdas de carga induzidas em canais circulares são menores. Vários estudos encontrados na literatura visam a possibilidade de implementar geometrias quadradas, retangulares, diamante, trapezoidais, elípticas entre outras [25; 26; 27].

Mayer [20], apresentou parâmetros para o dimensionamento de canais conformais com perfil circular consoante a espessura média da peça polimérica. Parâmetros esses que permitem definir o diâmetro do canal (D), a proximidade do canal à superfície moldante ($D_{c/cc}$) e a distância entre canais (P), conforme ilustrado pela Figura 2.7.

A comunidade científica nos anos posteriores à respetiva publicação tem adotado esses parâmetros com valores de referência fidedignos. Esses valores podem ser consultados na Tabela 2.1 .

Tabela 2.1: Dimensionamento de canais conformais circulares segundo Mayer [20].

Espessura da peça [mm]	D [mm]	P [mm]	$D_{c/cc}$ [mm]
> 2,00	4,00 - 8,00	2,00 - 3,00×D	1,50 - 2,00×D
2,00 - 4,00	8,00 - 12,00	2,00 - 3,00×D	1,50 - 2,00×D
4,00 - 6,00	12,00 - 14,00	2,00 - 3,00×D	1,50 - 2,00×D

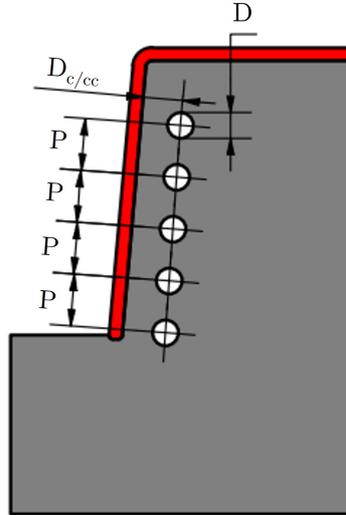


Figura 2.7: Parâmetros de dimensionamento de canais conformais circulares.

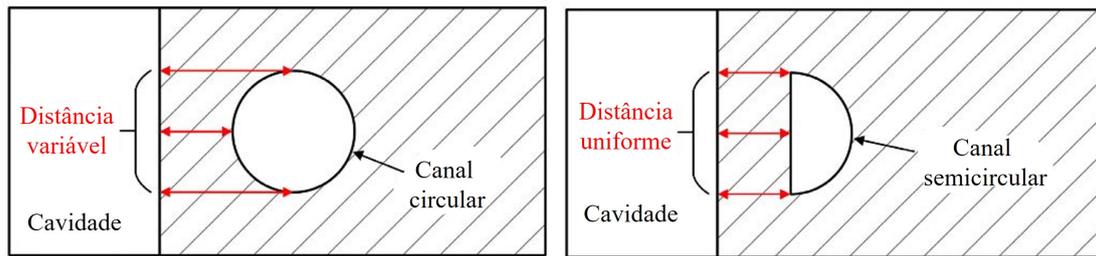
No entanto, devido à complexidade das peças poliméricas, perfis circulares nem sempre são a melhor opção num SCT de um molde de injeção.

Altaf e Rani [28], consideram que a utilização de perfis circulares apresenta diversas vantagens face à sua facilidade de implementação e de produção por processos de Manufatura Aditiva (MA). Além disso, conforme já referido, perfis circulares não induzem alterações no perfil de escoamento. Tal como se pode verificar pela Equação 2.7, o número de Reynolds é diretamente proporcional ao diâmetro hidráulico, sendo que no caso de perfis circulares este tem o valor de 1. Para perfis semicirculares, por exemplo, o diâmetro hidráulico é inferior a 1, pelo que o número de Reynolds também será menor. Alterações no regime de escoamento do fluido de permuta pode implicar que seja requerida uma maior potência de bombagem da unidade termorreguladora para garantir um regime turbulento completamente desenvolvido [12].

$$\text{Re} = \frac{\rho \times v \times D_h}{\mu} \quad (2.7)$$

No entanto, a geometria circular do canal não permite garantir uma distância constante entre a cavidade moldante e a fronteira do canal. Através da Figura 2.8 é possível verificar o argumento defendido por Altaf e Rani [28]. Como proposta, é sugerido a utilização de uma geometria semicircular, visto que esta garante uma distância constante entre a fronteira do canal e a superfície moldante. De modo a validar a viabilidade da geometria, os autores, por simulações numéricas utilizando o ANSYS Workbench[®] *thermal analysis*, demonstraram que o perfil semicircular permitiria reduzir o tempo de arrefecimento em cerca de 22%, e consequentemente o tempo do ciclo de injeção.

Apesar deste valor ser bastante aliciente, esta geometria pode induzir na ferramenta moldante concentrações de tensão indesejadas, que a longo prazo poderão comprometer a integridade estrutural da ferramenta moldante [12].



(a) Canal circular (distância não-uniforme) (b) Canal semicircular (distância uniforme)

Figura 2.8: Comparação geométrica entre perfil circular e semicircular [12].

Saidin et al. [26] conduziram um estudo onde avaliaram quatro geometrias diferentes para serem implementadas num SCT. As geometrias circular, quadrada, elíptica e diamante, conforme ilustradas na Figura 2.9, foram as consideradas pelo autor. De acordo com Au e Yu [29], quanto maior a área efetiva do perfil do canal, maior será a taxa de dissipação de calor no processo de moldação. Deste modo, Saidin et al. [26], definiram o fator de forma (Equação 2.8) como o perímetro da geometria circular e o das restantes formas. Considerando as dimensões geométricas das secções apresentadas na Figura 2.9, a área efetiva do perfil circular e elíptico é 27% e 38% menor do que o perfil quadrado, respetivamente.

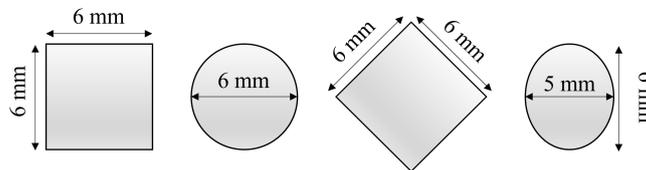


Figura 2.9: Perfis dos canais utilizados no estudo de Wahab Saidin et al. [26]

$$F_f = \frac{\text{Perímetro quadrado}}{\text{Perímetro do perfil}} \quad (2.8)$$

A análise, que os autores em questão efetuaram visava determinar o tempo necessário para que as condições de extração fossem garantidas, utilizando as diferentes geometrias nos canais. Para o efeito, o *software* utilizado foi o AMI[®]. De modo a ter um ponto de referência, os autores analisaram também o tempo que um canal circular convencional (retilíneo perfurado), levaria para obter os requisitos de extração. A orientação dos perfis, relativamente à superfície moldante encontra-se representada na Figura 2.10.

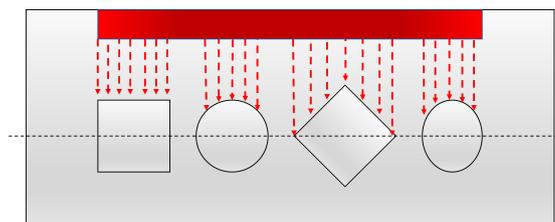


Figura 2.10: Variação da distância cavidade-fronteira do canal, adaptado de [26].

Os resultados revelaram que os perfis quadrado e circular conformal, foram as geometrias que reduziram mais significativamente o tempo para a extração. A redução de tempo foi de 61,03%, 60,09%, 55,56% e 48,85% para o perfil quadrado, circular, elíptico e diamante, respetivamente. Através destes resultados o autor conseguiu retirar várias conclusões. A mais evidente é que a utilização de canais conformais reduz consideravelmente o tempo de ciclo, quando comparado com um canal convencional. Conforme já referido, Au e Yu [29] consideraram que a área efetiva (Tabela 2.2) do canal é um dos fatores que condiciona mais a dissipação de calor, pelo que seria de esperar que o perfil quadrado e diamante apresentassem valores semelhantes. No entanto, conforme já citado por Khurram Altaf e Ahmad Rani [28], a distância entre a superfície moldante e a fronteira do canal deve ser constante, como tal é justificável a discrepância entre os resultados do perfil diamante e quadrado.

Tabela 2.2: Parâmetros geométricos dos perfis utilizados por Wahab Saidin [26].

Perfil secção transversal	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	D _H [mm]
Quadrada	36,00	24,00	6,00
Circular (conformal)	28,27	18,85	6,00
Circular (convencional)	28,27	18,85	6,00
Diamante	36,00	24,00	6,00
Elíptica	23,70	17,36	5,44

Saidin et al. [26] não efetuaram uma análise à qualidade final da peça polimérica (*warpage* e *shrinkage*). No entanto, analisaram a temperatura em pontos de referência na peça de modo a analisar a diferença de temperatura máxima que nela existiria no momento da extração, visto que os defeitos normalmente encontrados são devido a diferenciais de temperatura significativos na peça. De modo geral, todos os perfis de geometria conformal demonstraram variações de temperatura menores quando comparado com o canal circular convencional. No que concerne o perfil quadrado, este não revelou ser o mais eficiente nesta vertente, contudo, a diferença entre este e o perfil circular era insignificante, pelo que o autor considerou que o perfil quadrado seria aquele que em contexto prático apresentaria melhor performance térmica face às condições de processo impostas [26].

Num outro estudo efetuado por Jahan et al. [27], foram analisadas cinco geometrias diferentes – circular, quadrada, retangular, elíptica e semicircular. O estudo consistiu no *redesign* de um molde da Hewitt Molding[®]. A peça a ser injetada era uma tampa cilíndrica com espessura de 1,5 mm, em Polipropileno (PP). O estudo DOE efetuado, consistiu na elaboração de dois *sets* de estudo. O primeiro *set*, utilizando um perfil circular, consistiu em definir os parâmetros apresentados por Mayer [20], D, P e D_{c/cc}, conforme a Tabela 2.1. Através da utilização de estratégias convencionais (canais maquinados), foram necessários 30 s para a peça apresentar requisitos mínimos para ser extraída do molde. Com a utilização de canais conformais circulares esse valor foi inferior independentemente dos parâmetros, anteriormente referidos, utilizados. Dos 45 resultados obtidos, o menor tempo de arrefecimento foi alcançado com um canal de 4 mm de diâmetro, 8 mm de passo e 6 mm entre o centro do canal e a superfície moldante, sendo que a

duração deste foi de 14,38 s. Neste estudo foi possível concluir que quando os parâmetros são acoplados, o *design* que apresenta melhores resultados é quando o D e o P são os menores [25]. No segundo *set*, foi considerado um valor fixo, proveniente do primeiro *set* (6 mm), entre o centro do canal e a superfície moldante. Jahan et al. [27] procuraram analisar como D e o P influenciavam o tempo de arrefecimento. Os autores concluíram que, para diâmetros iguais e valores de passo diferentes, o tempo de arrefecimento aumentava com o incremento de P, porque consequentemente o comprimento do canal diminui [25]. Por outro lado, quando P é um valor fixo (16 mm) e D aumenta, o tempo de arrefecimento diminui. Este resultado era esperado, pois, com o aumento do diâmetro do canal, a área superficial de contacto com o canal aumenta, o que consequentemente permite transferir calor do polímero a uma taxa mais elevada, diminuindo assim o tempo de arrefecimento [25].

As limitações do processo de MA não permitem que geometrias hexagonais sejam utilizadas como secção do perfil do canal [30]. Conforme referido Jahan et al. [27], consideraram no seu estudo cinco geometrias, pelo que, se pode concluir que o perfil retangular é a geometria com o tempo menor de arrefecimento (10,15 s). Os autores explicam o resultado tendo como base o estudo de Altaf e Rani [28], uma vez que o perfil retangular é aquele cuja aresta apresenta um comprimento maior paralelamente à cavidade, ou seja, uma maior área de transferência de calor.

Através dos estudos apresentados anteriormente, verificou-se que perfis com arestas paralelas à cavidade promoviam a taxa de transferência de calor entre o polímero e os canais do SCT. Atendendo a este fator, Kamarudin et al. [17], propuseram a hipótese de aplicar ranhuras adjacentes à fronteira do perfil. As diferentes configurações dos canais utilizados no estudo estão ilustradas pela Figura 2.11. Dada a complexidade geométrica, é requerido a utilização de processos como o Selective Laser Melting (SLM), visto que este processo não apresenta limitações de fabrico quanto à geometria tridimensional [31]. A peça em questão utilizada no estudo foi a mesma já utilizada num estudo de Shayfull et al. [32], pelo que os autores, como termo de comparação, mantiveram todos os parâmetros inerentes ao processo de injeção. Às ranhuras em questão, pode ser atribuído o nome de alhetas ou *fins* na literatura anglo-saxónica, as quais permitem aumentar a área de contacto e deste modo aumentar a taxa de transferência de calor. Para além de influenciarem a performance térmica do molde, as alhetas de perfil quadrado ou retangular contribuem para uma maior rigidez à ferramenta moldante [33]. A espessura das alhetas foi sempre constante em todos os casos de estudos, sendo que esta correspondia a 1 mm e a distância entre o centro de alhetas adjacentes era de 2 mm. Na Tabela 2.3 são apresentados a área e o perímetro dos respetivos perfis.

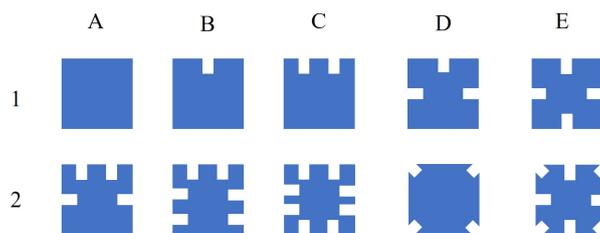


Figura 2.11: Perfis quadrados com alhetas internas, adaptado de [17].

Tabela 2.3: Área e perímetro dos perfis com alhetas internas [17].

Perfil	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2
Área [mm ²]	36,00	35,00	34,00	33,00	32,00	32,00	30,00	28,00	28,00	25,30
Perímetro [mm]	24,00	26,00	28,00	30,00	32,00	32,00	36,00	40,00	40,00	41,70

O processo foi simulado através do Autodesk Moldflow Insight[®]. No caso de estudo A1 (Figura 2.11), o tempo para atingir a temperatura de extração foi de 10,55 s. Através deste valor, efetuaram-se análises comparativas entre os restantes perfis. Dos 10 perfis utilizados no estudo, o E1 (Figura 2.11), foi aquele que apresentou uma melhor performance, visto que o tempo para atingir a temperatura de extração era de 8,50 s. Apesar de se verificar uma melhoria de 19% quando comparado com o perfil quadrado sem alhetas, a distribuição de temperatura no molde foi praticamente inalterada. A diferença de temperatura foi entre 33,59°C e 34,67°C, sendo que se verificou apenas cerca de 1°C de diferença entre o valor mais alto e o mais baixo das distribuições de temperatura. Conforme referido, o perfil E1 foi aquele que apresentou melhor performance, os autores associaram o resultado à simetria que o perfil apresenta, visto que este permite que haja uma uniformidade térmica no fluido de permuta. Tecnicamente, de acordo com Kamarudinet et al. [17] quanto maior o número de alhetas (E2), menor seria o tempo para que ocorresse a extração, devido ao aumento de velocidade que poderia ser gerado no canal. No entanto, tal não se verificou, visto que para o perfil E2 foram necessários 9,74 s para que ocorresse a extração. Os autores assumiram que tal ocorreu por congestionamento no fluido de permuta devido à abundância de alhetas [16; 17]. A adição de alhetas aos canais aumenta a superfície de contacto do canal, como tal a taxa de transferência de calor deveria ser superior [16]. Contudo, as perdas de cargas devido à complexa geometria do canal são notáveis, alterando deste modo o regime de turbulência do escoamento, e consequentemente a taxa de transferência diminui.

Kamarudinet et al. [34], efetuaram também um estudo nas mesmas condições de processo e com a mesma peça polimérica, que o estudo anteriormente apresentado. Neste estudo procurou-se analisar a possibilidade da aplicação de alhetas externas nos canais em vez de alhetas internas. Na Figura 2.12, estão ilustrados os perfis considerados no estudo, e na Figura 2.13 está representada a disposição do canal no molde que o autor considerou. Na Tabela 2.4 estão apresentados os valores da área e perímetro dos diferentes perfis.

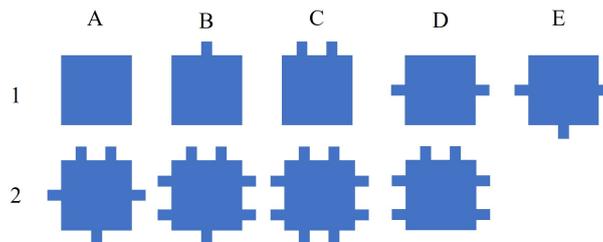


Figura 2.12: Perfis quadrados com alhetas externas, adaptado de [34].



(a) Vista em corte da cavidade moldante (b) Perfil da secção transversal do canal

Figura 2.13: Alhetas nos canais do SCT, por Khairu Kamarudin et al.[34].

Tabela 2.4: Área e perímetro dos perfis com alhetas externas [34].

Perfil	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1
Área [mm ²]	36,00	37,00	38,00	38,00	39,00	41,00	43,00	44,00	42,00
Perímetro [mm]	24,00	26,00	28,00	28,00	30,00	34,00	38,00	40,00	36,00

Com o aumento da área e do perímetro do canal, Kamarudin et al. [34], verificaram que o perfil C2 (Tabela 2.4) apresentou um tempo para a extração menor (7,99 s). Além disso, os restantes perfis apresentaram valores inferiores, quando comparados com os perfis com alhetas internas. Deste modo o autor pode concluir através dos dois estudos que a adição de alhetas contribui significativamente para a diminuição do tempo de arrefecimento.

No entanto, a quantidade de alhetas e a sua localização deve ser bem definida, pois, verificou-se em ambos os estudos que os melhores resultados não são obtidos com o maior número de alhetas e perfis simétricos apresentam uma melhor resposta à transferência de calor.

Freitas et al. [35], analisaram a performance térmica de perfis com alhetas e *slots*, para aplicação em sistemas de controlo de temperatura em moldes de injeção. Dada a complexidade geométrica dos perfis, conforme ilustrado pela Figura 2.14, os autores não realizaram uma análise ao processo de MI na íntegra, visto que seria necessário um grande poder computacional para simular com alguma precisão o caso de estudo aplicado a uma ferramenta moldante. Deste modo, os *inputs* da simulação numérica, como caudal, temperatura de fluido e temperatura de cavidade foram considerados valores de referência de estudos presentes na literatura. Os autores concluíram que a utilização de alhetas radiais (Figura 2.14 (c)) direcionadas para a fonte de calor, permitem que a taxa de transferência de calor seja 150% maior, quando comparado com um canal circular sem alhetas. No entanto, de notar que as condições de simulação utilizadas no estudo em questão são simplistas, pelo que, quando simulado na íntegra um processo de injeção com o todo o molde, os valores podem ser bastante discrepantes, devido à interferência entre canais adjacentes [26]. Além disso, a produção desta tipologia de canal, mesmo utilizando processos como o SLM, é uma tarefa extremamente complexa e está condicionada pelas limitações do processo [30].

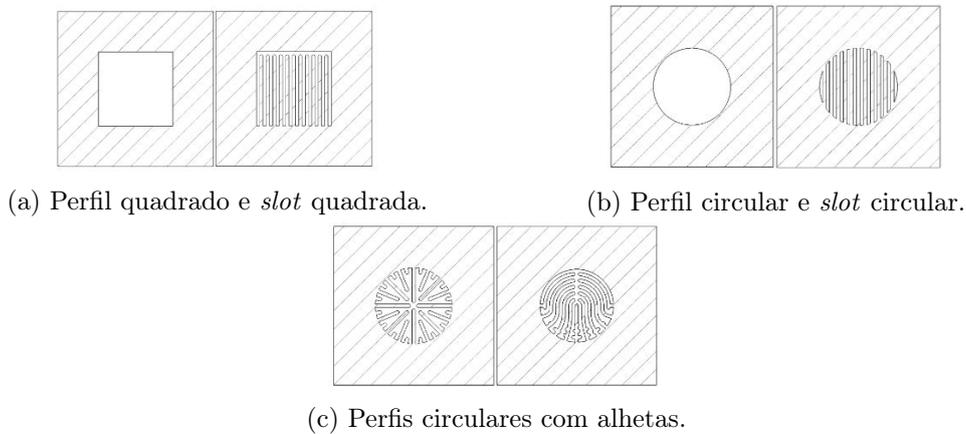


Figura 2.14: Perfis utilizados no estudo efetuado por Paulo Freitas et al. [35].

Através dos estudos previamente enunciados, foi possível verificar que a utilização de geometrias como perfis quadrados e retangulares promovem aumentos na taxa de transferência de calor entre a cavidade e o fluido de permuta. Em acréscimo, a aplicação de alhetas nos canais revelou ser também uma boa estratégia para aumentar a performance térmica da ferramenta moldante sem que os custos associados à produção desta aumentassem significativamente. No entanto, todos os estudos apresentados foram baseados numa metodologia DOE, o que requer longos períodos de planeamento e simulação para encontrar os melhores parâmetros para um SCT. Além disso, é sempre necessária a decisão do projetista e esta requer um vasto conhecimento em diferentes áreas científicas.

Algumas ferramentas *Computer Aided Engineering* (CAE) foram desenvolvidos para efetuar dimensionamentos de SCT mais rápidos e que não requeresse conhecimentos especializados em diferentes áreas. Funções objetivo foram propostas na literatura com o intuito de aumentar a taxa de arrefecimento e homogeneizar a distribuição de temperatura na cavidade moldante [36]. Vários algoritmos e métodos foram também desenvolvidos para resolver as funções multi-objetivo. Diagramas de Voronoi [37] e algoritmos genéticos [38] são dois exemplos de algoritmos utilizados no dimensionamento de SCT conformais.

De modo a perceber a potencialidade destes algoritmos e métodos no projeto de SCT, a próxima secção do estado da arte será dedicada à temática.

2.4.3 Dimensionamento automático de sistemas de controlo de temperatura conformais

Os métodos apresentados até à data não fornecem uma forma automática para gerar o *layout* do canal em peças de geometria livre [37].

Modelos e ferramentas de apoio ao dimensionamento automático de canais conformais revelam ser uma mais-valia para a indústria, visto que permitem diminuir consideravelmente a fase de dimensionamento e projeto tornando assim os custos associados ao projeto da ferramenta moldante menores. Contudo, tais ferramentas ainda apresentam diversas limitações, mais especificamente relacionadas com a conceção e fabricação das geometrias geradas.

Wang et al. [37], apresentaram um estudo em que a disposição dos canais no molde é definida através do diagrama de Voronoi. O dimensionamento automático utilizando algoritmos avançados, como é o caso, é tratado como um processo sequencial [39]. Quando a peça apresenta uma geometria complexa (*free form surface*), deve ser dividida em zonas e o dimensionamento do SCT deve de ser feito de forma localizada e não globalmente [37]. O processo de dimensionamento apresentado por Wang et al. [37], inicia-se com a criação de uma superfície, por um *offset* da peça polimérica, em que a distância entre as duas corresponde a $D_{c/cc}$ (Figura 2.6). Para tal devem ser considerados as regras de projeto já apresentadas em 2.4.1. A superfície gerada é dividida em duas regiões, a $M_{cavidade}^c$ e a M_{bucha}^c consoante a localização do plano de partição no molde, de modo a que quando gerado o canal o mesmo não intercete o plano de partição [37]. Posteriormente, ambas as superfícies são discretizadas em elementos triangulares (malha). O diagrama de Voronoi centroidal é aplicado para formar as regiões hexagonais conforme apresentado por Vallete et al. [40]. Uma vez que as fronteiras são obtidas por elementos triangulares, é necessário que estas sejam suavizadas utilizando softwares dedicados [41]. Caso não fosse efetuada a suavização, o circuito iria ter um perfil em ziguezague, o que podia alterar o regime de escoamento do fluido [37]. Por último, o canal é gerado através de uma *sweep feature*, sendo que o diâmetro é definido consoante as regras de projeto já enunciadas em 2.4.1, as etapas descritas estão ilustradas pela Figura 2.15.

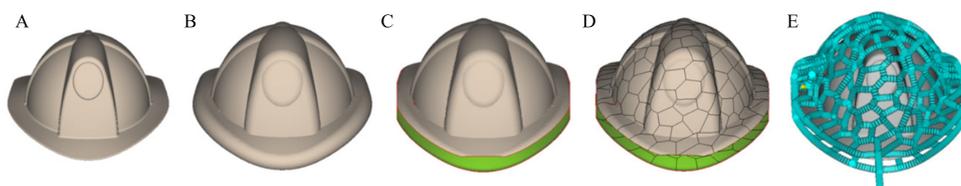


Figura 2.15: Dimensionamento do SCT através do método de Wang et al. [37].

Apesar de ser um processo de dimensionamento automático, é necessário fornecer *inputs* às ferramentas de modelação e de cálculo, para que a rede de canais seja gerada. Sendo que estes cálculos se baseiam em modelos analíticos semelhantes ao apresentado pela Equação 2.3 e 2.4.

De modo a verificar a eficiência deste método, Wang et al. [37] efetuaram um estudo numérico onde foram abordados dois casos de estudo, o primeiro tratava-se de um capacete miniatura, em que o material escolhido foi o Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o segundo caso foi a carcaça de um telefone, em que foi utilizado PP.

O *software* utilizado para simular o processo e o arrefecimento, foi o AMI[®]. Em ambos os casos foi feita uma análise comparativa entre a utilização de uma rede de canais convencional e a rede de canais em estudo. A aplicação do método apresentado por Wang et al. [37] revelou resultados aliciantes dado que, para além de uma redução significativa do tempo de ciclo (*i.e.* 26% no capacete), houve também uma melhoria considerável na distribuição de temperaturas em ambas as peças. Contudo, associados a métodos de dimensionamento automático, existem alguns problemas práticos. No cálculo dos *inputs* é necessário assumir um valor do tempo de ciclo para determinar parâmetros necessários ao dimensionamento do restante SCT. No caso do capacete, o tempo inicialmente considerado fora de 20 s, no entanto, a simulação apresentou um tempo de ciclo de 36,41 s. Valor este que foi posteriormente ajustado para 50s, para garantir que a simulação duraria

41,28 s. Relativamente às condições do fluido, devido ao grande número de ramificações, o perfil do escoamento altera-se afetando a turbulência, o que conseqüentemente irá requerer potências de bombagem superiores, pela unidade termoreguladora. Por último, a utilização do método apresentado por Wang et al. [37], apesar de apresentar resultados numéricos consideráveis, não é garantido que a ferramenta moldante apresente rigidez para suportar forças de fecho elevadas em contexto de operação [37].

Até agora os estudos apresentados, sejam eles de dimensionamento paramétrico ou automático, consideravam que a distância entre a cavidade e o canal conformal era constante, visto que é geralmente considerado que a superfície moldante se encontra a uma temperatura uniforme [42]. No entanto, esta consideração não é totalmente correta, pois a peça polimérica pode apresentar concentrações térmicas, denominadas *hot spots* [21]. O facto de o canal conformal ser um circuito inteiramente conectado, faz com que este represente algumas limitações geométricas, a questão dos *hot spot* é um exemplo das limitações associadas ao circuito do SCT conformal.

Seo-Hyeon et al. [42], apresentaram recentemente um novo modelo de SCT conformal, através da aplicação de estruturas micro-celulares em vez de um circuito ao longo do molde com uma secção transversal definida. Estruturas celulares têm sido aplicadas em contexto de engenharia devido ao elevado rácio rigidez/massa que estas apresentam. Em estudos presentes na literatura, a aplicação de estruturas do tipo celulares em treliça, têm revelado diversas vantagens quanto à sua performance térmica e estrutural. Seo-Hyeon et al. [42], utilizou estruturas TPMS, inspiradas em organismos biológicos [43]. O *software* que permite gerar estas geometrias é *open-source* e permite gerar ficheiros *Standard triangle language* (STL) que permite efetuar simulações através do método dos elementos finitos [44].

O processo de MI foi inicialmente simulado utilizando estratégias convencionais (canais maquinados e palheta), para servirem como termo de comparação. O SCT convencional está ilustrado pela Figura 2.16. Como é possível de se verificar após 30 s de arrefecimento a peça de modo geral encontra-se abaixo da temperatura recomendada para a extração, com a exceção da zona localizada como *hot spot*. A peça ao ser extraída nestas condições apresentará defeitos devido à força aplicada pelos extratores [42].

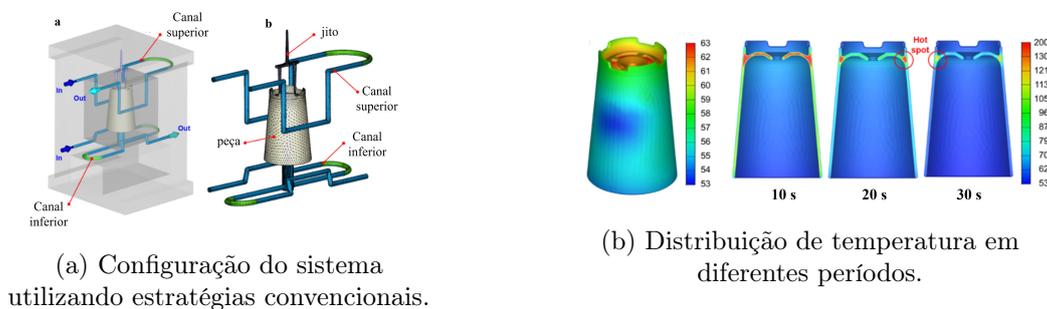


Figura 2.16: Estudo comparativo SCT convencional, adaptado [42].

Para validação das simulações numéricas (realizadas recorrendo à ferramenta numérica Moldex3D[®]) o inserto foi produzido por MA e esteve posteriormente submetido a vários testes. Na Figura 2.17 está ilustrado as configurações utilizadas por Seo-Hyeon et al., em que a estrutura TPMS (2.17b) foi comparada com um sistema palheta (2.17a).

A bucha, como se pode verificar na Figura 2.18, foi dividida em duas secções de modo a reduzir os custos de fabrico, ou seja, a parte da estrutura TPMS foi obtida por MA enquanto a parte inferior (inserto), foi produzida por processos de maquinagem e furação [42].

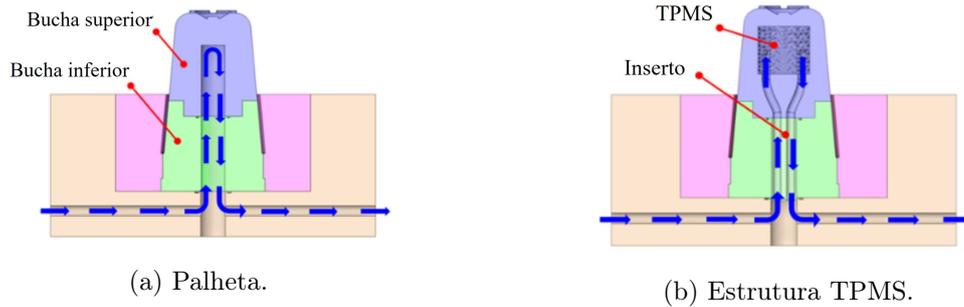


Figura 2.17: Secção em corte das configurações utilizadas no estudo de Seo-Hyeon et al., adaptado de [42].

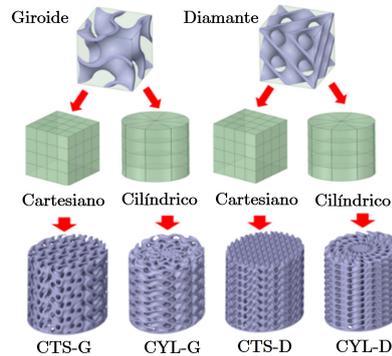


Figura 2.18: Estruturas TPMS, adaptado de [42].

No que concerne estruturas TPMS existe uma panóplia de configurações possíveis de serem geradas no sistema de coordenadas cartesiano ou cilíndrico [44]. No caso do estudo em questão foram avaliadas diferentes possibilidades. Tratando-se uma peça de revolução, utilizou-se o sistema de coordenadas cilíndricas de superfície giroide (CYL-G). Apesar de não ser de fácil percepção, estruturas TPMS conseguem aumentar a turbulência localmente, devido à constante mudança de direção de fluxo, o que por consequência reduz o potencial aparecimento de zonas de estagnação [45].

Através dos resultados obtidos pelos autores foi possível concluir que a estrutura TPMS requer apenas de 15 s enquanto os sistemas convencionais requerem 25 s para que a peça no momento da extração não sofra deformações. Valores estes que correspondem a uma redução de 40% no tempo de arrefecimento [42]. Além disso, o arrefecimento ocorre mais uniformemente, ou seja, sem gradientes de temperatura consideráveis na peça. A questão dos *hot spots* foi resolvida neste caso com a aplicação deste método. Uma vantagem que estas estruturas têm é o facto de a sua geometria ser considerada *free form*, pois possibilita que os pinos extratores sejam inseridos nas estruturas, que

ao contrário que acontece com as restantes estratégias conformais, o projetista deve de colocar os pinos estrategicamente de modo que não haja interferência entre o SCT e o sistema de extração [42].

Apesar dos resultados bastante aliciantes dos estudos apresentados em 2.4.2 e 2.4.3, não é possível definir um método geral paramétrico para o dimensionamento de sistemas conformais. Peças de geometria diferente, polímeros diferentes e condições de processo diferentes é o principal fator que impossibilita que seja efetuada uma análise conclusiva.

Deste modo, é crucial elaborar um plano de estudos de modo que seja possível analisar diferentes parâmetros em diferentes condições de operação, de modo que possam ser redigidas regras parametrizadas de modo a tornar o dimensionamento de SCT conformais numa prática mais rápida e intuitiva. Tendo como finalidade a implementação, de um modo generalizado, desta categoria de sistemas na indústria de moldes.

2.5 Tecnologias para fabrico de canais conformais

A fabricação de ferramentas moldantes na indústria, até à data, está muito dependente de processos de manufatura subtrativos (*e.g.* maquinagem e eletroerosão). Fator condicionante no que concerne ao desenvolvimento de ferramentas moldantes com SCT conformal.

Feng et al. [12] enumeram várias técnicas passíveis de serem utilizadas para produção de moldes com canais conformais. No entanto, algumas destas estratégias ainda estão pouco desenvolvidas e não são viáveis para produções volumosas. Das estratégias apresentadas, as que apresentam melhores condições para produção de insertos metálicos são o processo de SLM e *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). Estes processos até à data têm-se revelado concorrentes dos processos de maquinagem, normalmente utilizados. No entanto, o fabrico de peças por adição de metal é realizado como processo de conformação, sendo depois necessário o recurso a maquinagem para retificação e acabamento da geometria do inserto moldante [46].

A matéria-prima utilizada em ambos os processos mencionados apresenta-se em pó. Os dois processos recorrem à utilização de um laser, no entanto, no caso do DMLS são utilizados dois pós, um ligante e um de base, sendo que o pó ligante é aquele que é sinterizado, pois apresenta um ponto de fusão menor. Por outro lado, o processo SLM apenas utiliza um pó metálico e este aproxima-se mais da fusão da partícula do material do que da sua mera sinterização, permitindo deste modo obter uma peça com maior resistência e densidade [46]. Revelando-se uma mais-valia para o fabrico de ferramentas moldantes, visto que, são componentes mais rígidos quando comparados com aqueles produzidos por DMLS, garantindo diretamente um maior período de operação. Pelo que o processo de SLM se revela uma mais-valia para o fabrico de insertos moldantes com canais conformais, apesar das suas limitações.

2.5.1 SLM – *Selective Laser Melting*

SLM é um processo de impressão 3D e a tecnologia foi desenvolvida em 1995 por cientistas alemães. O processo utiliza um feixe laser de alta potência, que funde o pó metálico seletivamente. Após a sinterização de uma camada, a plataforma de construção baixa a altura correspondente a uma cama e é adicionado mais uma camada de pó por um elemento móvel (*e.g.* rolo). No final da impressão o pó que não foi sinterizado é aspirado e pode ser utilizado numa nova impressão. A respetiva sinterização do metal necessita de

ser realizada numa atmosfera controlada, utilizando uma gás inerte, normalmente árgon, de modo que este não reage com a impressão. Na Figura 2.19 estão representados todos os elementos que constituem o funcionamento base deste processo de manufatura.

Com um tamanho de grão compreendido entre 10 a 45 μm este processo sinteriza camadas com 20 a 100 μm de espessura, permitindo garantir tolerâncias dimensionais até $\pm 0,2$ mm e a espessura mínima de parede admissível é de 1 mm. No mercado existe uma panóplia de pós metálicos que podem ser utilizados neste processo. Desde aços de alta performance mecânica (*e.g.* Maraging 18Ni300), a materiais de elevado custo como o ouro e o titânio [46].

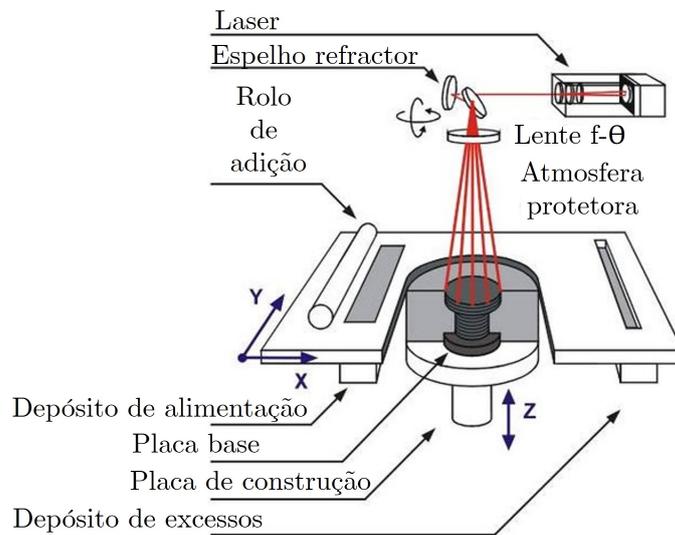


Figura 2.19: Esquema representativo de funcionamento do processo de FSL [47].

2.6 Síntese de estado da arte

A revisão da literatura permitiu compreender que o desenvolvimento e a utilização de canais conformais no processo de MI é crucial para a melhoria de qualidade, não só pela redução de defeitos associados a anomalias no controlo de temperatura de moldes, mas também na redução do tempo de ciclo.

Contudo, é notável que a estratégia/metodologia adotada para o dimensionamento de canais conformais separa a opinião dos projetistas. A utilização de modelos paramétricos e modelos automáticos é o contraste que melhor se verifica no que concerne o dimensionamento conformal. Relativamente ao dimensionamento paramétrico verifica-se de modo geral que a geometria da secção transversal é um dos fatores que mais condiciona a performance térmica do SCT, como se pode verificar pelos estudos de Saidin et al. [17; 26]. Para além disso, no estudo de Kamarudinet et al. [34] a utilização de alhetas adjacentes a um canal também revelaram apresentar melhorias significativas no processo de MI. Independente da geometria utilizada, as regras de projeto de Mayer [20] são as mais utilizadas no dimensionamento. Apesar destas estarem dependentes de fatores relacionados com as propriedades reológicas do polímero, encontram-se adaptadas às limitações do processo DMLS.

Conforme se verificou pela análise dos processos de fabrico de canais conformais, as tecnologias de MA estão em constante desenvolvimento, tais como o processo de SLM que permite a obtenção de geometrias impossíveis de obter por DMLS a uma precisão bastante razoável.

No caso da utilização de modelos automáticos para o dimensionamento de SCT, tanto a utilização de diagramas de Voronoi como a utilização de estruturas TPMS revelaram ser uma mais-valia para o dimensionamento de SCT visto que a dependência da decisão do projetista não é tão preponderante. Apesar do referido, a utilização deste tipo de modelo cria geometrias em que o escoamento do fluido de permuta pode entrar na categoria de microfluídica e por vezes os *softwares* não estão preparados para esses tipos de escoamento, pelo que, por vezes, os resultados podem ser aquém da realidade.

2.7 Metodologia de análise

O objetivo desta dissertação é colmatar as dificuldades que a indústria de moldes apresenta na etapa de dimensionamento de um SCT conformal. Como tal, pretende-se realizar estudos que permitam definir diretrizes de projeto, e, numa fase posterior, estas possam ser aplicadas na generalidade no desenvolvimento de ferramentas moldantes para o processo de MI. Para tal serão elaboradas várias análises numéricas recorrendo ao software AMI[®], visto que este é um *software* comercial que permite simular com um grau de precisão considerável o comportamento polimérico no processo de MI. A elaboração desta dissertação será dividida em 3 etapas, sendo que na primeira etapa será escolhida uma geometria de peça e respetivo material, bem como o respetivo dimensionamento da ferramenta moldante e sistemas inerentes. A segunda etapa será dedicada meramente ao *software* e à preparação do estudo numérico, onde será abordado o domínio de cálculo e as condições de processamento impostas de modo a favorecer a qualidade da peça, ou seja, será dada principal importância à análise de contração volumétrica e empenos. Por último, a terceira etapa, será dedicada meramente ao dimensionamento de sistemas de controlo de temperatura, sendo que serão realizadas várias análises comparativas, avaliando as cotas críticas da peça na extração, visto que as tolerâncias dimensionais impostas no projeto de peça serão consideradas como requisito funcional. Através dos estudos paramétricos será possível avaliar parâmetros, como a localização e geometria do canal, de modo que, seja possível elaborar regras de auxílio ao projeto térmico de ferramentas moldantes.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O presente capítulo visa apresentar todo o desenvolvimento necessário para o dimensionamento das ferramentas moldantes das peças utilizadas como base do estudo que se pretende realizar. Para além do molde, também será definida a máquina de injeção que se consideraria ser necessária para o sucesso e viabilidade económica do processo.

3.1 Geometria da peça polimérica

Conforme referido anteriormente, o estudo que se pretende elaborar requer a escolha de uma peça polimérica.

Kanbur et al. [8] apresentou uma tabela com os estudos que demonstraram melhores resultados utilizando canais conformais como SCT. A geometria mais comum nos estudos são caixas retangulares.

Tendo isto em consideração irá optar-se por uma peça de geometria retangular. A peça que se pretende utilizar está esquematizada na Figura 3.1. Geometrias semelhantes são encontradas em embalagens no setor alimentar.

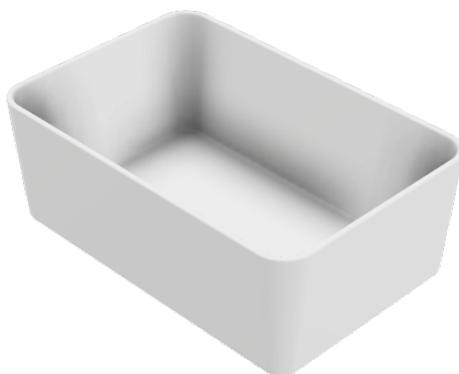


Figura 3.1: Peça proposta para o estudo.

3.2 Material

Sendo uma peça utilizada no setor alimentar, o polímero utilizado na sua produção não pode apresentar índices de toxicidade. Pelo que nesta tipologia de projeto deverá ter-se em consideração os regulamentos publicados pela União Europeia em 2011, (*Food Contact Plastics Regulation*) [48] e pela FDA (*U.S. Food and Drug Administration*). Além disso, consideraram-se como requisitos globais, resistência ao impacto e boa estabilidade dimensional e térmica. Tratando-se de um utensílio para o sector alimentar, o custo unitário deve ser o mais baixo possível, pelo que o preço do material também deverá ser tido em consideração.

Utilizando a base de dados Granta EduPack[®], foi possível analisar propriedades de diferentes materiais que cumpriam com os requisitos impostos. Os polímeros que melhor se destacaram tendo em conta as condições impostas foram o Polietileno de alta densidade (PEAD), PP e Poliamida 6 (PA6). Na Tabela 3.1 são apresentadas as propriedades dos respetivos materiais.

Tabela 3.1: Propriedades dos polímeros selecionados, Granta EduPack[®].

Propriedade	PEAD	PP	PA6
Módulo de Elasticidade [MPa]	1080,00	1475,00	944,00
Tensão limite de cedência [MPa]	26,00	31,90	38,60
HDT/B, 0,45 MPa [°C]	79,00	92,70	175,00
Resistência ao impacto (Izod, 23°C) [kJ/m ²]	6,14	2,26	45,50
Temperatura máxima de serviço [°C]	113,00	95,10	90,00
Contração volumétrica média [%]	2,25	2,25	1,00
Preço [€/kg]	1,03	1,10	2,05

Os três materiais selecionados são aprovados pelas entidades reguladoras anteriormente referidas, no que concerne os índices de toxicidade. Relativamente aos requisitos impostos, o PEAD é o polímero que de modo geral se enquadra melhor na tipologia de peça e no estudo que se pretende realizar. O PP é o polímero com maior rigidez (maior módulo de elasticidade), no entanto, este parâmetro não foi considerado como exclusivo, visto que as peças em questão não estarão sujeitas a solicitações mecânicas significativas. No critério de seleção foi considerado também a contração volumétrica média do polímero, sendo que o PEAD e o PP são aqueles que apresentam valor superior (2,25%). Idealmente na MI para garantir as tolerâncias dimensionais impostas é aconselhável a utilização de um polímero com baixa contração volumétrica, no entanto, no estudo que se pretende efetuar a utilização de um polímero com elevada taxa de contração volumétrica é requerida de modo a perceber a influência da utilização de canais conformais e como estes melhoram a qualidade final das peças. A temperatura máxima de serviço foi considerada também como um requisito, sendo que o PEAD apresenta um valor superior comparativamente com os restantes.

Peças normalmente utilizadas no sector alimentar são produzidas em lotes volumosos, sendo crucial para a viabilidade económica do processo utilizado um polímero que para

além de cumprir os requisitos funcionais e estéticos, pratique o preço mais baixo possível por quilograma. Atendendo ao apresentado, optou-se pela utilização do PEAD.

Dada a vasta gama de marcas presentes no mercado de PEAD, recorreu-se à base de dados *online* Omnexus[®] [49] para selecionar o fabricante do material. A marca do polímero é Sabic[®], e a designação do mesmo é Sabic[®] HDPE CC3054. Este polímero é aprovado pela FDA (U.S *Food and Drug Administration*) e pela *Food Contact Plastics Regulation*. As propriedades gerais deste material podem ser consultadas na Tabela 3.2 e a sua ficha técnica pode ser consultada em A.

O *software* AMI[®] apresenta uma vasta base de dados, sendo que a todos os materiais da base de dados é atribuída uma classificação consoante o grau de definição do material na respetiva base de dados. O material escolhido encontra-se classificado como *Gold* (classificação mais elevada), o que irá garantir maior precisão de resultados.

Tabela 3.2: Propriedades gerais SABIC[®] HDPE CC3054.

Propriedades gerais SABIC [®] HDPE CC3054	
Módulo de Elasticidade [MPa]	917,00
HDT/B, 0,45 MPa [°C]	82,00
Densidade do fundido [kg/m ³]	702,42
Condutividade térmica [W/m°C]	0,24

3.3 Modelação geométrica

Como referido anteriormente, a modelação das peças foi efetuada utilizando o Autodesk Inventor Professional[®] (AIP[®]), visto que é um *software* versátil, que permite realizar o projeto de molde no mesmo ambiente de trabalho. No que concerne ao processo de MI existem diversas diretrizes estabelecidas para o projeto do molde e peça, que asseguram a qualidade final da peça, e conseqüentemente a viabilidade do processo. De acordo com Berins [50], o intervalo de espessuras aconselhado para peças injetadas em PEAD é entre 0,89 mm e 6,35 mm. Atendendo a isto, e à função que a peça desempenha, optou-se por uma espessura de 2 mm. De modo a garantir que no momento da extração a peça é extraída da cavidade moldante sem qualquer resistência, esta deve apresentar ângulos de saída compreendidos entre 0,75 a 2° [1].

Os polímeros são sensíveis ao entalhe, por isso, são zonas de fragilidade devido à concentração de tensões. A concentração de massa pode ser um fator propício à formação de rechupes. Deste modo devem ser colocados raios de concordância na peça, visto que, não altera a funcionalidade da mesma e para além de garantir melhores condições no processo de MI, o custo de produção da ferramenta moldante é mais baixo, por não solicitar processos como a eletroerosão para a produção da mesma [1].

Por último, no que concerne o dimensionamento da geometria, é crucial estabelecer tolerâncias dimensionais. Para tal, recorreu-se à norma ISO 20457:2018 [51]. As tolerâncias do desenho técnico da peça podem ser consultadas no Anexo B.

3.4 Molde

Um molde, conforme já explicado na secção 2.2, é uma ferramenta que se destina a dar forma a um determinado material. O sistema de um molde é composto por chapas e diversos acessórios que têm como função suportar os elementos moldantes e os sistemas funcionais do molde [1]. De modo geral, este pode ser dividido em duas partes: fixa e móvel. A parte fixa do molde é, por convenção, onde está localizada a cavidade, e na parte móvel a bucha, visto que, esta configuração facilita a extração da peça [1].

3.4.1 Definição do *layout* e estrutura do molde

A primeira consideração a ter ao iniciar o dimensionamento da ferramenta moldante é definir o número de cavidades consoante o volume de produção anual e a gama de máquinas disponíveis para a produção [1]. Tendo em consideração que se pretende realizar estudos numéricos, é preferencial que o molde seja simples para que o esforço computacional requerido seja o mais baixo possível. Deste modo, o molde projetado é de mono-cavidade.

Dada a simplicidade da peça, o molde será apenas constituído por cavidade e bucha separados por um plano de partição [7]. A definição do plano de partição, ou linha de junta, é a zona de abertura do molde onde se separa a bucha da cavidade para extrair a peça [1]. A localização do plano de partição irá, conseqüentemente, definir a direção de abertura do molde. A localização deste também contribui diretamente para a qualidade da peça, devido à presença de vestígios da localização do mesmo [52]. Considerando a geometria proposta, o plano de partição deveria estar localizado na extremidade da peça coincidente com a aresta (Figura 3.2a). No entanto, devido a questões relacionadas com a funcionalidade da peça, conforme indicado na secção 3.3, a mesma apresenta raios de concordância para evitar arestas vivas. Como tal o plano de partição está localizado como ilustrado pela Figura 3.2b, pois caso ocorra uma pequena fuga de material pela junta, formando rebarba, esta é mais facilmente extraída.

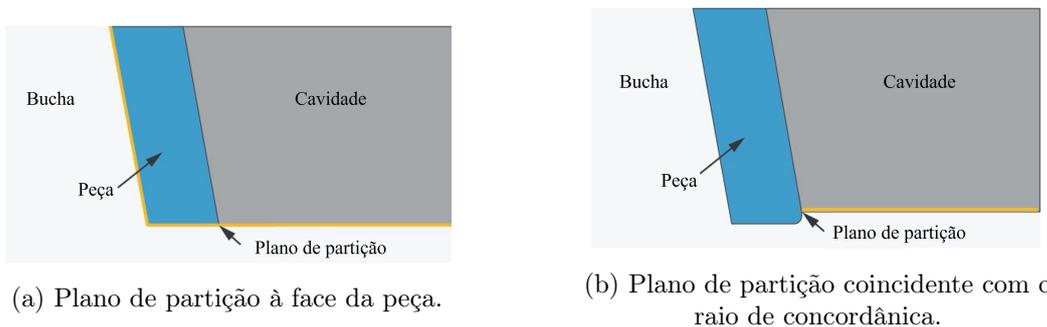


Figura 3.2: Plano de Partição.

Assim, existindo apenas um plano de partição, a direção de abertura do molde ocorre axialmente, ou seja, a cavidade é posicionada, no referencial cartesiano, coincidente com o eixo das cotas (z) [7].

A etapa que se segue no dimensionamento é a definição da estrutura do molde. Existem inúmeras classificações para moldes na indústria, a mais usual é relativa ao sistema de alimentação [1]. Estes podem ser classificados em três tipos: moldes de canais frios, canais isolados ou canais quentes, sendo que dentro destas tipologias ainda existem outras

configurações disponíveis. A escolha do sistema de alimentação é baseada essencialmente no tipo de peça e no volume de produção que se pretende. Os sistemas mais usuais na indústria são os canais frios e os canais quentes. Os canais frios são um sistema pouco dispendioso do ponto de vista de produção e manutenção, e possibilita a utilização de vários tipos de polímeros, no entanto, o material do jito e dos canais de alimentação é considerado desperdiço do processo, sendo que apenas uma percentagem permite ser reutilizado. Por outro lado, nos canais quentes os desperdícios são cerca de 20% menores e o tempo de ciclo também é 20% menor. No entanto, o investimento inicial e os custos de manutenção são superiores, justificando-se apenas para produções avultadas e em moldes multi-cavidade [7; 53]. A utilização de canais quentes implica que no dimensionamento do SCT sejam considerados mais fatores, visto que, a presença de uma fonte de calor próxima da cavidade moldante afetará a performance térmica do molde.

Considerado as geometrias propostas, a utilização de canais frios seria justificada visto que, o molde apenas apresenta uma cavidade. No entanto, conforme referido na secção 3.1 a peça em questão não é considerada uma peça técnica, mas sim de uso comum, ou seja, será expectável que em contexto industrial fosse uma peça produzida em grandes volumes. Como tal, o molde apresentaria várias cavidades e o desperdício de material seria um fator preponderante para a viabilidade económica da produção [1]. Consequentemente, e de modo a garantir que as condições do processo se assemelham o máximo possível a um cenário de produção industrial, foram escolhidos canais quentes para o sistema de alimentação. O dimensionamento deste será mais especificado na secção 3.4.3.

Como é utilizado um sistema de canais quentes, o molde é constituído por duas placas, uma vez que o jito não solidifica [1].

Relativamente às dimensões que a cavidade e a bucha devem apresentar, não existe uma regra geral entre projetistas.

O método da sobreposição de Menges [54], relaciona as dimensões da cavidade com a deformação elástica máxima que pode ocorrer no molde durante o processo. Os moldes de injeção são expostos a carregamentos mecânicos elevados, sendo que apenas podem apresentar deformações elásticas [54]. Neste método é necessário conhecer a pressão de injeção e definir previamente o material utilizado no molde. Kazmer [7], já referenciado anteriormente, relaciona as dimensões do molde com o diâmetro dos canais do SCT, o que implica que este seja previamente dimensionado. No entanto, o autor considera que numa etapa preliminar seja atribuído um valor hipotético compreendido no intervalo de 4,76 a 15,88 mm para o diâmetro do canal. Pelo que se considerou um diâmetro de 10 mm para os canais do SCT.

Relativamente ao material dos moldes, Kazmer [7] correlaciona diferentes propriedades para o definir. Através da relação difusividade térmica/tensão limite de fadiga, maquinabilidade/dureza e custo de operação/custo de manutenção é possível definir o material. Os materiais que, de modo geral, cumprem um maior número de requisitos, são os aços AISI P20, AISI S7 e AISI 1045. O aço AISI P20 é em si o material mais utilizado na indústria para o fabrico de ferramentas moldantes uma vez que é um aço relativamente económico, de boa maquinabilidade, permitindo acabamentos superficiais bastante aceitáveis, contudo, este não permite a obtenção de insertos por manufatura aditiva. Deste modo, considerou-se a utilização de diferentes materiais para a bucha e para a cavidade. O desenho técnico do molde com as respetivas cotas de atravancamento pode ser consultado em C.

Na secção seguinte serão apresentados mais detalhes relativamente aos materiais utilizados no molde.

3.4.2 Máquina de injeção

A constituição típica de uma máquina de injeção é baseada em quatro elementos: unidade de fecho; unidade de comando; unidade de injeção; unidade de potência [1].

Devido ao facto de existir uma grande standardização de componentes na indústria de moldes, é possível a utilização de uma máquina de injeção em moldes da mesma tipologia (tamanho e pressão de injeção). Pelo que a decisão de compra de uma máquina de injeção deve ser ponderada.

Para a seleção da máquina de injeção é necessário considerar vários fatores, sendo que os parâmetros que condicionam a escolha é a pressão de injeção e as dimensões das placas do molde. A pressão máxima que ocorre na cavidade permite calcular a força de fecho da unidade de fecho da máquina, e esta é expressa pela Equação 3.1.

$$F_{\text{fecho}} = P_{\text{cavidade}} \times A_{\text{cavidade projetada}} \quad (3.1)$$

Para prever a pressão de injeção é necessário calcular a queda de pressão que ocorre na cavidade.

Segundo a lei da viscosidade de Newton, a viscosidade não é uma função da taxa de corte [7]. Quando as propriedades do material não se regem pela lei, este é considerado um fluido não-Newtoniano. Um dos modelos mais simples que caracteriza fluidos não-Newtonianos é a lei de Power, comumente designada por *Power Law*, conforme a Equação 3.2.

$$\eta = k \times \dot{\gamma}^{1-n} \quad (3.2)$$

Kazmer [7], através da combinação de várias equações da mecânica de fluidos, apresenta a Equação 3.3, que permite calcular a queda de pressão que ocorre na cavidade. Sendo que esta é correlacionada com parâmetros intrínsecos à geometria da peça.

$$\Delta P = \frac{2 \times \mu_{\text{power law}} \times L}{w} \times \left[\frac{2 \times (1 + \frac{1}{n}) \times \bar{v}}{w} \right]^n \quad (3.3)$$

Conforme se verifica pela Equação 3.3, é necessário, para além dos parâmetros intrínsecos à geometria da peça, determinar previamente a velocidade média com que o polímero deverá ser injetado na cavidade. Esta é passível de ser calculada pela Equação 3.4, também apresentada por Kazmer [7]. Os parâmetros relativos ao material e às condições de processamento utilizadas para o cálculo da velocidade média de injeção estão apresentados na Tabela 3.3. Sendo que para o polímero escolhido obteve-se uma velocidade média de injeção de 0,23 m/s.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{5 \times (T_{\text{fusão}} - T_{\text{superficial molde}}) \times k}{3 \times \mu}} \quad (3.4)$$

Tabela 3.3: Propriedades de material para cálculo da velocidade média de injeção.

Parâmetro	
Temperatura de fusão [°C]	225,00
Temperatura superficial do molde [°C]	35,00
Condutividade térmica [W/m.k]	0,24
Viscosidade dinâmica [Pa.s]	1460,00

Através do valor da pressão de injeção é possível calcular a força de fecho que a unidade de fecho necessita de aplicar. Os valores considerados para o cálculo da força de fecho são apresentados pela Tabela 3.4. Alguns valores relativos ao PEAD foram consultados no livro de Kazmer [7]. Pelo que se obteve uma força de fecho de 51,67 toneladas.

Tabela 3.4: Propriedades de material para cálculo da Pressão/Força de injeção.

Parâmetro	
Viscosidade Power Law [Pa.s ⁿ]	16500,00
Índice de Power Law	0,38
Espessura [mm]	2,00
Planificação [m]	0,21

Através da consulta de catálogos técnicos da marca Arburg[®], na gama de máquinas hidráulicas a máquina de injeção escolhida foi a Allrounder 420C de 88 toneladas, com um diâmetro de fuso de 35 mm. A ficha técnica da respetiva máquina pode ser consultada em D.

3.4.3 Sistema de injeção

O sistema de injeção, ou de alimentação, é composto por um conjunto de componentes metálicos que têm como função encaminhar o polímero fundido para o interior do molde e preencher as cavidades ocas existentes no seu interior [1].

Conforme já referido na secção 3.4.1 existem diferentes tipologias de sistemas de alimentação, sendo que as mais comuns são os de canais frios e os de canais quentes. Apesar de o sistema de canais frios ser um sistema de mais fácil implementação, os canais quentes permitem cadências de produção superiores, qualidade da peça superior, redução da pressão requerida de injeção e redução considerável de material desperdiçado. O sistema de canais quentes é constituído essencialmente por, jito principal, bloco de distribuição e bicos de ataque aquecidos [1].

Para dimensionar o sistema de alimentação é necessário escolher a localização do ataque. O correto posicionamento deste irá ditar a qualidade final da peça, como tal, a posição deste deve controlar/minimizar/evitar defeitos de enchimento [1]. Os defeitos mais comuns, relacionados com um mau posicionamento do ataque, são devido ao efeito

de jato e à hesitação de fluido. Pelo que, é recomendado que o ataque seja colocado de modo a que o escoamento do fluido tenha a menor resistência possível e a marca deste não seja muito pronunciada na peça final.

Através do *software* AMI[®] é possível efetuar uma análise às peças para definir a melhor localização do ataque (*Gate Location*), todavia, dada a simplicidade geométrica das peças, e tendo em consideração o objetivo lato da dissertação, não se considerou relevante apresentar tal análise. A localização do ataque na peça está ilustrada pela Figura 3.3.

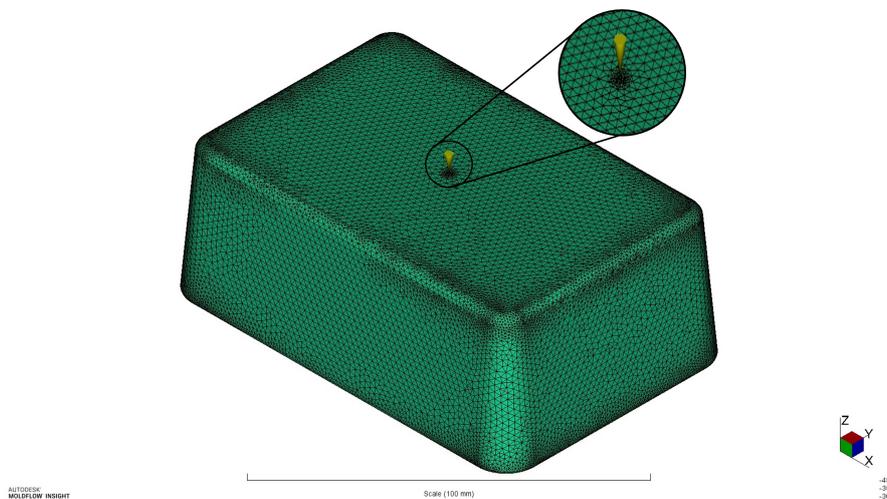


Figura 3.3: Localização do ataque na peça.

Após a definição da localização do ataque, o ponto seguinte seria escolher a geometria do canal de alimentação consoante o tipo de material a injetar [1]. Porém, sendo um sistema de canais quentes, e considerando a geometria da peça, não são necessários canais de alimentação, pelo que a injeção é direta.

O sistema de canais quentes direto é a tipologia mais simples que existe nesta categoria, para além disso, apresenta vantagens em moldes de grandes dimensões [55]. Contudo, a utilização de canais quentes faz com que na localização do ataque seja uma zona de grandes concentrações térmicas. O que faz com que nessa respetiva zona a parede da peça após a extração esteja ligeiramente fragilizada e, como tal, não é possível garantir que a mesma cumpra com os requisitos impostos. Uma estratégia para colmatar a situação é efetuar um *redesign* e na zona do ataque criar uma sobre espessura, conforme ilustrado no desenho técnico na vista auxiliar B, no Anexo B.

Tratando-se de uma indústria que apesar de permitir algum grau de personalização, os componentes integrantes na generalidade são normalizados, o que permite tornar o dimensionamento mais rápido e eficiente através da consulta de catálogos técnicos. Deste modo, recorreu-se a um catálogo da marca HASCO[®] para escolha do bico de injeção [56]. Na categoria de bicos de injeção existe uma variada gama, pelo que se considerou que a utilização de um bico de injeção direta valvulado seria a escolha mais acertada face às condições de processamento impostas. O bico valvulado é constituído por dois componentes, o bico de injeção e a unidade da válvula. Permitindo, deste modo, montar diferentes tipologias de bicos de injeção com este componente. A empresa HASCO[®] apresenta duas

variantes do sistema de válvula, por acionamento pneumático ou hidráulico. Optou-se pela unidade hidráulica uma vez que a respetiva máquina de injeção também ela é de acionamento hidráulico, com a referência H2020/12/160×246×76/S. Relativamente ao bico de injeção a escolha deste está maioritariamente relacionada com o tipo de polímero e a respetiva massa a injetar na cavidade. No que concerne o polímero, conforme referido, será utilizado o PEAD sem qualquer tipo de reforço. Quanto à massa de polímero a injetar para a cavidade, esta é passível de ser obtida por dois métodos – analiticamente ou numericamente.

Analiticamente a massa do polímero pode ser obtida sabendo a densidade do polímero ($\rho = 0,95 \text{ g/cm}^3$) e o volume da peça. Sendo esta igual a 45,00 g. O segundo método seria através do AMI[®], visto que o volume preenchido não corresponde a 100% devido à contração volumétrica da peça na cavidade. Apesar de o grau de precisão ser maior através do método numérico, este não é a melhor opção, visto que as condições de processamento influenciam diretamente a contração volumétrica da peça, e estas ainda não se encontram devidamente definidas. Pelo que se deve considerar o método mais conservador, ou seja, o analítico. Por último, tendo em consideração as dimensões do molde, o bico de injeção escolhido é o H334011/32×80. A ficha técnica da unidade de válvula e do bico de injeção encontram-se no Anexo E e F, respetivamente.

3.4.4 Sistema de controlo de temperatura

Independente da metodologia escolhida para o sistema de controlo de temperatura, convencional ou conformal, é necessário efetuar uma análise analítica através de modelos semelhantes ao apresentado na secção 2.4.

O sistema de controlo de temperatura dimensionado nesta secção, será também utilizado na secção 4.1 para realizar o estudo de independência de malha. Apesar dos objetivos gerais desta dissertação se focarem maioritariamente em sistemas conformais, o sistema dimensionado nesta secção será convencional, mais precisamente canais em ziguezague circulares. A disposição destes na cavidade e na bucha é definida consoante as relações já apresentadas na secção 2.4.1.

O modelo utilizado no dimensionamento é o apresentado por Kazmer [7], dado que o modelo considera que toda a carga térmica do polímero deverá ser extraída por convecção através do SCT, pelo que este modelo se torna mais conservador.

A Equação 3.5 permite calcular a carga térmica total do material polimérico fundido.

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} = \frac{m \times c_p, \text{ polímero} \times T_{\text{fusão}} - T_{\text{extração}}}{t_{\text{ciclo}}} \quad (3.5)$$

Foi considerado para o cálculo deste valor, uma massa de 45,00 g de material polimérico, um calor específico de 3029,20 J/kg.°C (Anexo A), uma temperatura de extração de 107,00°C e uma temperatura de fusão de 225,00°C. O tempo estimado de ciclo foi calculado através da Equação 3.6.

$$t_{\text{ciclo}} = \frac{w^2}{\pi^2 \times \alpha} \times \ln \left(\frac{4}{\pi} \times \frac{T_{\text{fusão}} - T_{\text{fluido}}}{T_{\text{extração}} - T_{\text{fluido}}} \right) \quad (3.6)$$

Considerando os valores já referidos, uma difusividade térmica (α) de $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e uma temperatura de fluido refrigerante de 25°C, estimou-se um tempo de ciclo de 4,6 s.

Pelo que se obteve,

$$\dot{Q}_{\text{polímero}} = 6556,30 \text{ W}$$

O caudal volumétrico do fluido refrigerante pode ser calculado através da Equação 3.7. O calor da linha (\dot{Q}_{linha}) é a carga térmica do polímero ($\dot{Q}_{\text{polímero}}$) dividido pelo número de linhas do sistema de controlo de temperatura, pelo que se considerou apenas duas, uma, na bucha e outra na cavidade.

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_{\text{linha}}}{c_{\text{fluido}} \times \rho \times \Delta T} \quad (3.7)$$

Considerou-se um valor de $997,00 \text{ kg/m}^3$ para a densidade e $4180,00 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (valores retirados da base de dados do AMI[®]) para a capacidade térmica mássica da água, respetivamente. A variação de temperatura entre a temperatura de entrada e saída do fluido foi de 3°C .

Como tal, obteve-se um caudal de $\dot{V}=8,40 \text{ L/min}$.

Por último, utilizando a Equação 3.8, para calcular o diâmetro mínimo que o canal deve apresentar de modo a garantir que a carga térmica do polímero removida.

$$D_{\text{min}} = \sqrt[4]{\frac{128 \times \mu \times L \times \dot{V}}{\pi \times \Delta P}} \quad (3.8)$$

Considerando um comprimento de linha de $1,40 \text{ m}$, uma viscosidade de $8,9 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$, e uma queda de pressão de 100 kPa , obteve-se, $d_{\text{min}} = 6,14 \text{ mm}$. Dentro dos valores normalizados para os diâmetros dos canais o valor imediatamente superior ao obtido é $8,00 \text{ mm}$, pelo que será esse o valor considerado.

Para este modelo considera-se que $D_{\text{c/cc}}$ deve apresentar um valor compreendido entre $2 \times D$ e $5 \times D$ e P deve corresponder a um valor entre $2 \times D$ e $5 \times D$. Pelo que se obtêm os valores:

- $D = 8,00 \text{ mm}$
- $P = 16,00 \text{ mm}$
- $D_{\text{c/cc}} = 16,00 \text{ mm}$

Estes valores serão considerados na fase de dimensionamento das arquiteturas de controlo de temperatura, quer de cariz conformal ou convencional, como termo de referência e auxílio no projeto térmico do molde.

Com a definição da geometria da peça, respetivos materiais e sistemas inerentes ao processo de MI, procede-se à fase seguinte da elaboração da respetiva dissertação. Fase esta que consistiu na elaboração de um planeamento de estudos e análise. Sendo que numa primeira etapa foram definidos parâmetros relativos ao domínio de cálculo no *software* de modo a garantir a precisão dos resultados obtidos. Seguidamente, foi estudada a influência das condições de processamento e como estas condicionam a qualidade final da peça. Só numa etapa posterior, o foco foi meramente dedicado ao dimensionamento e análise de performance térmica dos respetivos canais convencionais e conformais.

Capítulo 4

Estudo numérico

O presente capítulo é dividido em 3 secções, focado na apresentação e preparação das condições de simulação utilizadas, bem como na apresentação e análise dos resultados dos estudos efetuados no AMI[®].

O AMI[®] é um *software* que permite a modelação do comportamento do material polimérico durante o ciclo de moldação. Este permite simular as diferentes etapas do processo de MI, enchimento (*Fill*), compactação (*Pack*) e arrefecimento (*Cool*). O *software* em questão permite também analisar e otimizar parâmetros inerentes ao processo de MI, num ambiente controlado. Habitualmente, na indústria, o estudo destes parâmetros é efetuado por experimentações, tornando-se numa etapa pouco eficiente e bastante dispendiosa. Contudo, é crucial garantir que, tanto as condições de processamento como o respetivo domínio de cálculo são devidamente definidos, para que os resultados dos mesmos se considerem fidedignos.

Nesse sentido, foi proposto efetuar uma análise *Cool(Finite Element Method (FEM)) + Fill + Pack + Warp* que permita avaliar a qualidade final da peça, sendo que, para avaliação da qualidade, definiu-se o cumprimento das tolerâncias dimensionais impostas às cotas da peça. Para tal foram selecionados nós, cujas coordenadas foram comparadas antes e depois da análise, deste modo, será possível verificar a performance do respetivo SCT em análise.

A primeira secção, conforme referido, corresponde ao estudo do domínio de cálculo que permitiu discretizar todos os elementos presentes nos estudos propostos (peça+molde).

Em seguida, na segunda secção, definiram-se as condições de processamento; deve ser ainda mencionado que estas foram definidas recorrendo a duas técnicas distintas. Numa primeira instância iterativamente, e posteriormente recorrendo a estudos DOE utilizando o método de Taguchi para otimizar as respetivas condições de processamento.

Por último, definidos todos os parâmetros do domínio de cálculo e as condições de processamento, procedeu-se aos estudos de análise térmica dos respetivos sistemas de controlo de temperatura, correspondente à terceira e última secção do respetivo capítulo.

O primeiro estudo, focado no SCT, é baseado numa estratégia usualmente utilizada na indústria, para estabelecer um termo comparativo entre a estratégia convencional e conformal.

Os estudos seguintes foram focados nas regras de projeto apresentadas por Mayer [20], onde foram considerados diferentes diâmetros. Nestes avaliou-se não só a qualidade final da peça como também as propriedades relativas ao SCT, nomeadamente a queda de pressão que ocorre no canal, o Número de Reynolds e a respetiva pressão de bombagem.

Por fim, foram apresentadas alternativas ao projeto de Mayer [20]. Sendo que estas foram ajustadas ao processo de SLM que demonstrou menos limitações que o processo DMLS.

4.1 Domínio de cálculo

Tratando-se de uma análise numérica, os domínios de cálculo são discretizados na forma de elementos discretos onde as leis matemáticas que regem o seu comportamento contribuem para o conhecimento e análise geral do problema [57]. Teoricamente, quanto mais discretizado for o domínio de cálculo (elementos menores) mais precisos serão os resultados obtidos na análise numérica, todavia, tal corresponderá a tempos de processamento maiores. Pelo que, se deve considerar uma relação de compromisso entre o tamanho do elemento considerado e o tempo de processamento requerido para concluir a análise.

O *software* permite discretizar o domínio de cálculo em 3 tipologias de análise *Mid-plane*, *Dual Domain* e 3D. A diferença baseia-se no modo de discretização espacial do domínio de cálculo [57]. Visto que se pretende estudar a influência de SCT conformais, é necessário realizar análises *Cool(FEM)*, ou seja, a utilização de uma malha 3D é um requisito.

A análise *Cool(FEM)* é realizada na presença do molde e do respetivo SCT. Deste modo, o molde passa a ser também um domínio de cálculo que é necessário discretizar. Desta forma, o estudo de independência de malha foi dividido em duas partes, a primeira relativamente à qualidade da malha da peça polimérica e a segunda relativamente à qualidade da malha do molde.

4.1.1 Peça

O modelo tridimensional da peça em formato .igs foi importado para o *software* através do Autodesk Moldflow Design Link[®] (AMDL[®]). A importação é feita como *Dual Domain* e depois é convertida para 3D já no ambiente de trabalho do programa. O tamanho do elemento é atribuído automaticamente pelo *software*, sendo que neste caso o tamanho do elemento era de 3,00 mm.

Apenas foram realizadas análises de *Fill+Pack* no estudo de independência de malha da peça. Efetuaram-se nove análises na qual o tamanho do elemento variava em decrementos de 0,25 mm entre 3,0 mm e 1,0 mm. Para além da qualidade de malha, na qual se deu maior relevância à razão de aspeto, também se comparou os resultados entre dois resultados relativos às etapas consideradas anteriormente, temperatura da frente de escoamento e pressão de injeção, com o propósito de estabelecer uma relação de compromisso entre a precisão de resultados e o tempo de processamento do estudo. As condições de processamento utilizadas no estudo estão apresentadas na Tabela 4.1. O intervalo de temperatura aconselhado para a injeção do polímero considerado é de 205 a 245°C, pelo que se optou por um valor médio de 225°C. Para a temperatura da superfície do molde também foi considerado um valor médio de 35°C. Relativamente ao controlo de enchimento, este não foi definido concretamente e foi deixado em modo automático de forma a que o *software* garantisse que a cavidade moldante fosse totalmente preenchida. Kazmer [7] considera que a pressão na fase de compactação/manutenção deve corresponder a um valor compreendido entre 50 a 90% da pressão de injeção. A qualidade final da peça no estudo de independência de malha não era uma prioridade, pelo que se considerou

que após o termino da etapa de enchimento a pressão dentro da cavidade fosse alterada para 80% da pressão de injeção e depois esta se mantivesse constante durante 10 s.

Os estudos foram efetuados com o sistema de alimentação definido para a peça em questão e este foi dimensionado diretamente no *software* de acordo com as dimensões presentes no Anexo B. De notar que a malha na zona do ataque foi refinada visto que se pretendia analisar o comportamento do escoamento do polímero, dado que se trata de uma zona onde se concentram tensões devido ao ataque.

Tabela 4.1: Condições de processamento do estudo de independência de malha da peça.

Parâmetro	
Temperatura de injeção [°C]	225,00
Temperatura molde (superfície) [°C]	35,00
Controlo de enchimento	Auto
Controlo de manutenção	
• Duração [s]	0 10
• Pressão [%]	80 80

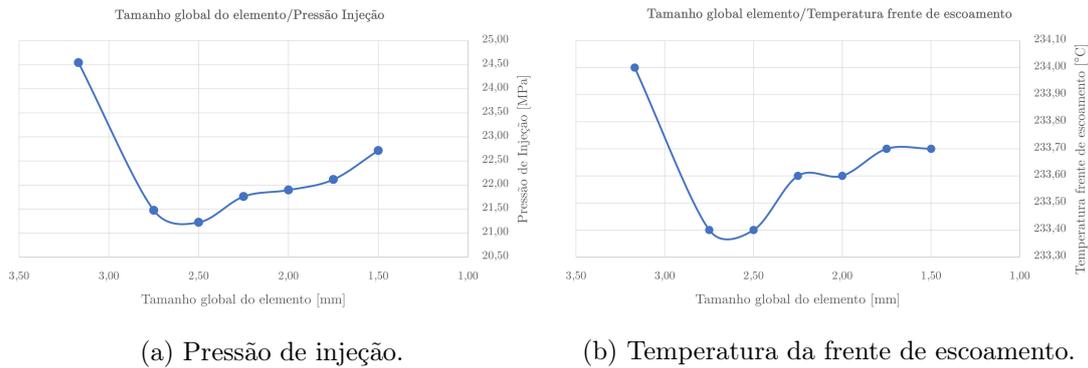
Com as condições de processamento apresentadas anteriormente obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.2, para os nove estudos realizados.

Tabela 4.2: Resultados estudo independência de malha da peça.

Tamanho [mm]	Número elementos	Razão de aspeto			P_{inj} [MPa]	$T_{frente\ escoam}$ [°C]	$t_{process}$ [min]
		Máxima	Média	Mínima			
3,00	136352	83,28	7,80	1,16	24,55	234,00	9,00
2,75	163445	88,74	7,15	1,32	21,47	233,40	11,00
2,50	195193	62,67	6,56	1,18	21,22	233,40	12,00
2,25	231595	71,67	6,01	1,22	21,76	233,60	16,00
2,00	293657	58,88	5,38	1,17	21,90	233,60	21,00
1,75	395913	77,21	4,60	1,23	22,11	233,70	26,00
1,50	544542	21,13	4,00	1,28	22,72	233,70	42,00
1,25	716000	20,81	3,58	1,22	22,58	236,30	54,00
1,00	1145552	16,08	2,98	1,08	21,80	239,10	92,00

Como referido, a malha foi avaliada tendo como base a razão de aspeto, sendo que esta é a razão entre o tamanho do lado maior do elemento e a altura do elemento que é perpendicular ao lado maior. Para os diferentes tipos de malha e estudos são estabelecidos pelo *software* valores máximos para garantir que os resultados obtidos sejam válidos. No caso de uma malha constituída por elementos tetraédricos, a razão de aspeto não deverá ser superior a 100:1 [58]. Como se pode verificar através da Tabela 4.2 a qualidade da malha melhora com a diminuição do tamanho do elemento, no entanto, para malhas muito refinadas o tempo de processamento ($t_{process}$) é consideravelmente mais elevado.

Foi considerado que quando a variação entre os resultados da pressão de injeção (P_{inj}) e a temperatura da frente de escoamento ($T_{frente\ escoam}$) tivessem uma variação inferior a 1%, os resultados obtidos com esse tamanho do elemento seriam válidos. A limitação imposta verificava-se a partir do elemento com tamanho de 2,25 mm, no entanto, a qualidade da malha do elemento com 2,00 mm era consideravelmente melhor e a diferença do tempo de processamento não era justificável (ver Figuras 4.1a e 4.1b). Pelo que se optou pelo elemento de 2,00 mm.



(a) Pressão de injeção.

(b) Temperatura da frente de escoamento.

Figura 4.1: Resultados das etapas de *fill+pack* no estudo de independência de malha da peça.

4.1.2 Molde

Relativamente ao estudo de independência da malha do molde, a metodologia foi semelhante ao da peça, porém, este foi dividido em duas etapas, uma vez que o AMI[®] faz, em primeiro lugar, uma discretização às superfícies do molde e, posteriormente, é feita uma discretização relativa à do volume do molde.

Para além das etapas de enchimento (*Fill*) e compactação (*Pack*) também se considerou a etapa de arrefecimento (*Cool(FEM)*), visto que se tratava de outro domínio de cálculo e, no caso deste *software*, o arrefecimento não influencia a etapa de enchimento e compactação. Para simular a etapa de arrefecimento é necessário um molde e um sistema de arrefecimento. O *software* em questão possui ferramentas tais como o *Cooling Circuit wizard* e o *Mold Block wizard*, sendo que estas permitem dimensionar sistemas de controlo de temperatura convencionais e um molde que aloje todos os domínios presentes no estudo, respetivamente.

O SCT dimensionado no *software* corresponde ao dimensionamento apresentado em 2.4 e este encontra-se representado na Figura 4.2.

Relativamente ao molde, as dimensões deste são calculadas pelo *software*, pois conforme referido, este deve alojar todos os sistemas (peça+sistema alimentação+sistema de controlo de temperatura). As respetivas dimensões do molde são:

- $x = 225,15$ [mm]
- $y = 225,15$ [mm]
- $z = 177,23$ [mm]

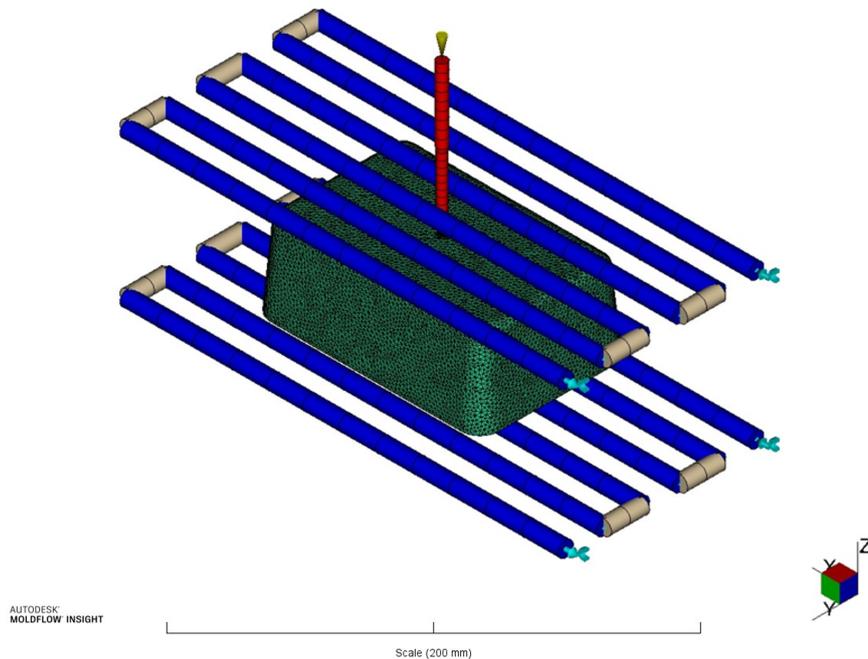


Figura 4.2: SCT para o estudo de independência de malha do molde.

No que diz respeito à discretização da superfície definiu-se que a superfície em contacto com a peça e com os canais deveria apresentar o mesmo tamanho de elemento, pelo que este foi definido como 2 mm. Quanto às restantes superfícies, o respetivo tamanho foi escolhido consoante os resultados das análises, sendo que este variou entre 8 mm e 2 mm em decrementos de 1 mm. As condições apresentadas são relativas à primeira etapa do estudo. A segunda parte do estudo consistiu em definir o número mínimo de camadas (*layers*) que separam a superfície interna e externa do molde, sendo que deve ser estabelecido um valor entre 4 e 40.

Em ambas as etapas os resultados analisados foram a temperatura média do molde e a temperatura média da superfície do molde. As condições de processamento utilizados foram as mesmas consideradas no estudo de independência da peça, conforme a Tabela 4.1. Relativamente aos parâmetros que afetam a etapa de arrefecimento foi considerado como fluido de permuta água a 25°C, 10 a 20°C abaixo da temperatura da superfície do molde (35°C), conforme regras gerais de projeto. A temperatura ambiente foi definida a 25°C e foi estipulado um número de Reynolds igual a 10000. O material considerado para o molde foi o aço AISI P20, sendo que a ficha técnica do respetivo pode ser consultada no Anexo G.

Os resultados obtidos para a primeira etapa do estudo são apresentados na Tabela 4.3. Através da sua análise foi possível verificar que para ambas as temperaturas consideradas (temperatura média do molde e temperatura média da superfície do molde), e independentemente do tamanho do elemento externo, a sua variação é inferior a 1%. Pelo que

a melhor opção seria utilizar 7 mm de tamanho de elemento, visto que o estudo em si, apresenta um menor tempo de processamento do que 8 mm. Contudo, importa avaliar também a qualidade da malha, sendo que, quando considerada a razão de aspeto alcançada em cada estudo, a malha de 6 mm é consideravelmente melhor (razão de aspeto máxima menor) do que as anteriormente referidas, pelo que se considerou que seria utilizada essa malha.

Tabela 4.3: Resultados estudo independência de malha do molde, tamanho do elemento.

Tamanho [mm]	Número elementos	Razão de aspeto			$T_{\text{molde méd}}$ [°C]	$T_{\text{molde sup}}$ [°C]	t_{process} [min]
		Máxima	Média	Mínima			
8,00	2332387	72,41	3,39	1,03	27,90	25,99	37,00
7,00	2398588	70,31	3,39	1,03	27,84	26,01	26,00
6,00	2489909	60,41	3,38	1,03	27,77	26,04	37,00
5,00	2624146	89,11	3,38	1,03	27,63	26,05	27,00
4,00	3068346	99,45	3,36	1,03	27,44	26,07	33,00
3,00	4290676	99,92	3,69	1,03	27,10	26,09	31,00
2,00	9708386	98,31	4,46	1,01	26,67	26,10	42,00

Por último, utilizando uma malha no molde com elementos externos com 6 mm e internos com 2 mm e com as condições de processamento definidas anteriormente, analisou-se a influencia do número de camadas entre a superfície externa e interna do molde. O número de camadas como já referido deve ser estabelecido num intervalo entre 4 e 40. Por defeito o software atribui um valor inicial de 6 camadas, pelo que apenas se analisou valores acima desse. Tratando-se de um intervalo de valores considerável, nos estudos efetuados considerou-se malhas com 6, 16, 26 e 36 camadas. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4.4, sendo que permitiram concluir que, para o caso em estudo, este parâmetro não influencia significativamente, visto que nos 4 estudos realizados a variação dos resultados analisados foram sempre inferiores a 1%. Deste modo, foi considerado a utilização de 6 camadas, uma vez que corresponde a um menor tempo de processamento.

Tabela 4.4: Resultados estudo independência de malha do molde, número de camadas.

Número camadas	Número elementos	Razão de aspeto			$T_{\text{molde méd}}$ [°C]	$T_{\text{molde sup}}$ [°C]	t_{process} [min]
		Máxima	Média	Mínima			
6,00	2489909	60,41	3,38	1,03	27,77	26,04	23,00
16,00	2641061	97,10	3,64	1,01	27,72	26,04	24,00
26,00	2788562	91,58	3,74	1,03	27,70	26,04	27,00
36,00	2933732	96,48	3,89	1,03	27,64	26,04	26,00

4.2 Condições de processamento – otimização

O objetivo lato desta dissertação é a parametrização global de canais conformais para aplicação no processo de MI. O controlo de temperatura da cavidade e da bucha é algo crucial para garantir a qualidade e a viabilidade do processo, pelo que deve ser salvaguardado que exista uma homogeneidade térmica na ferramenta moldante, particularmente quando se trata de impressões profundas [7]. Na literatura existem inúmeros casos de sucesso em que a utilização de canais conformais melhora consideravelmente a qualidade final das peças e reduz o tempo de ciclo, tornando assim o processo mais eficiente. Porém, as condições de processamento impostas têm também elas um grande peso na qualidade final da peça, sendo que estas podem ser definidas na máquina de injeção sem ser necessário efetuar alterações no projeto de molde.

O polímero utilizado, PEAD, apresenta uma contração volumétrica significativa, na ordem de 2,25% [1]. Assim sendo, os perfis de compactação podem ser considerados um dos parâmetros mais impactantes para garantir a redução de possíveis empenos e rechupes. No sentido de avaliar os parâmetros impostos foram efetuadas análises *Cool(FEM)+Fill+Pack+Warp*. Sendo que *Warp* não diz respeito a uma fase do processo de MI, mas sim um parâmetro de resultados relativos ao deslocamento da peça no ciclo.

Conforme já referido, a definição das condições de processamento foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu em definir iterativamente as condições de processamento atendendo às propriedades do polímero. A segunda etapa consistiu na otimização das condições de processamento pré-definidas, por um estudo DOE utilizando o método de Taguchi.

Para tal foi dimensionado um molde com um SCT conformal utilizando as regras de projeto apresentadas por Mayer [20]. Tratando-se de uma peça de 2 mm, o diâmetro do canal recomendado é um valor compreendido entre 4 e 8 mm, sendo que se optou pela utilização de um canal com diâmetro 4 mm, passo de 8 mm e uma distância entre a cavidade e centro do canal de 6 mm, de acordo com a Figura 2.6. Foi considerado que a entrada do fluido de permuta deveria ser a meio da peça, pois deste modo proporcionaria homogeneidade térmica na bucha. Na Figura 4.3 está uma representação gráfica da disposição dos canais dimensionados.

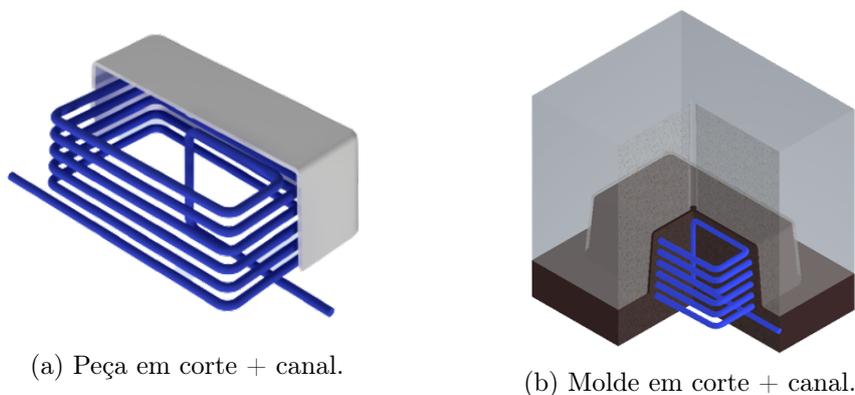


Figura 4.3: Disposição do canal conformal.

4.2.1 Definição iterativa das condições de processamento

Relativamente à primeira etapa, foram realizados quatro estudos, sendo que o propósito destes era definir o tempo de ciclo e os perfis de compactação que proporcionariam melhores resultados.

As características do domínio de cálculo dos estudos, utilizando os parâmetros definidos na secção 4.1, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Características do domínio de cálculo

Número elementos molde	Número elementos canal	Razão de aspeto		
		Máxima	Média	Mínima
1336429	2507506	75,10	7,90	1,00

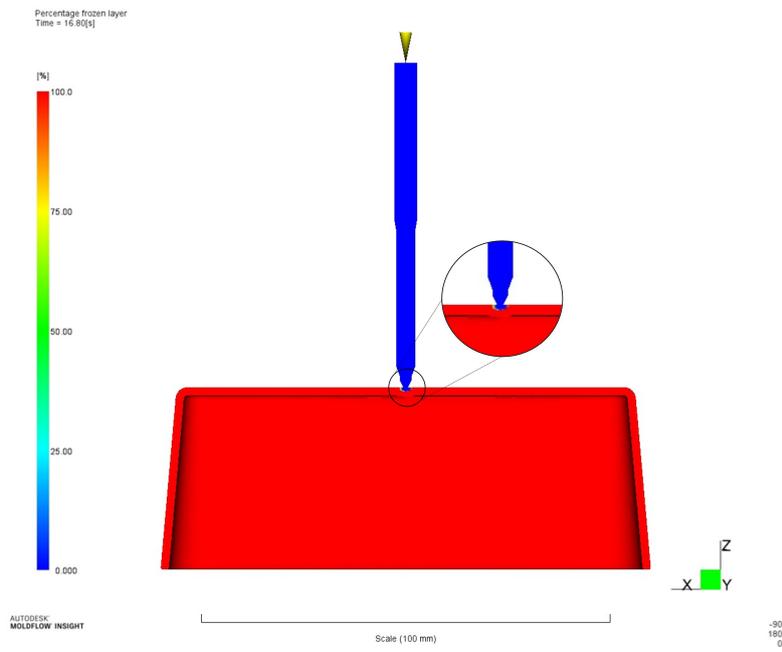
O Estudo 1 consistiu na definição do tempo de ciclo. Para tal, nas definições do *software*, o tempo de ciclo foi definido como automático (controlo de enchimento), ou seja, o tempo de ciclo termina quando a peça estiver 100% consolidada (valor definido no *software*) e a temperatura de extração tenha sido atingida. Note-se que a seleção do tempo como automático tem por objetivo averiguar o tempo e temperatura necessários à extração. As restantes condições de processamento estão apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Condições de processamento para definição do tempo de ciclo.

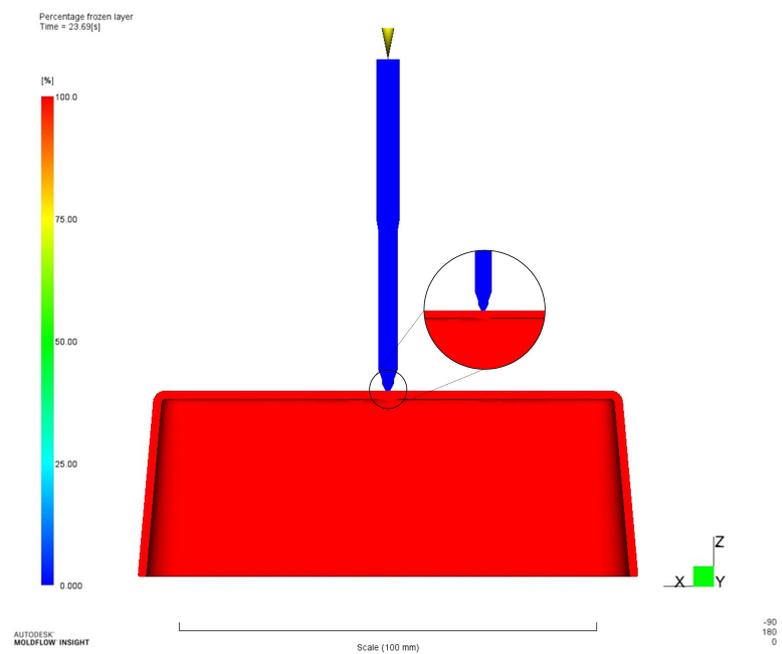
Parâmetro	
Temperatura de injeção [°C]	225,00
Temperatura molde (superfície) [°C]	35,00
Temperatura fluido [°C]	25,00
Caudal [l/min]	10,00
Controlo de enchimento	Auto
Controlo de manutenção	
• Duração [s]	0 10
• Pressão [%]	80 80

Para definir o tempo de ciclo, foi analisada a percentagem solidificada na peça ao longo do tempo. O tempo de ciclo registado para a peça em questão correspondia a 97,23 s, o que para a peça em questão é um valor extremamente elevado. Tal valor é explicado, devido ao facto de ter sido definido no *software* que a extração deveria ocorrer quando 100% da peça estivesse consolidada. No entanto, como se utiliza um canal quente, a zona próxima do ataque estará sempre a temperatura elevada, levando um tempo considerável para que o material nessa zona fique consolidado. Em contexto da indústria o canal é retraído para que tal não ocorra, no entanto, não é possível simular essa ação no *software*.

Assim, analisando os incrementos temporais, verifica-se que entre os 16,80 e os 23,69 s, de modo geral, a zona próxima do ataque consolida, como é possível verificar pela Figura 4.4.



(a) Percentagem consolidada após 16,80 s.



(b) Percentagem consolidada após 23,69 s.

Figura 4.4: Resultados em percentagem da camada consolidada da peça.

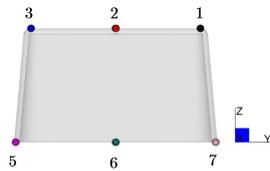
No entanto, implementando um coeficiente de segurança, considerou-se um tempo de ciclo de 35 s.

Deste modo, no Estudo 2 apenas foi considerado um tempo de ciclo de 35 s, mantendo-se inalteradas as condições de processamento apresentadas na Tabela 4.6.

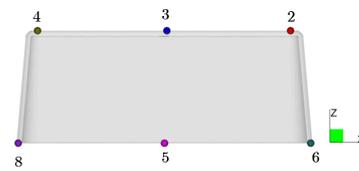
Relativamente aos deslocamentos, foi necessário selecionar determinados nós para avaliar as cotas dimensionais da peça no momento da extração. Utilizando os nós apresentados na Tabela 4.7a, foi possível analisar os deslocamentos que ocorrem nas cotas de atravancamento da peça e o respetivo cumprimento das tolerâncias dimensionais. A localização dos respetivos nós está ilustrada na Figura 4.5. Associando os nós simétricos é possível definir os segmentos que permitem definir as cotas da peça bem como a tolerância estabelecida para essa dimensão, conforme apresentado na Tabela 4.7b.

Tabela 4.7: Nós e respetivos segmentos para avaliação dos deslocamentos.

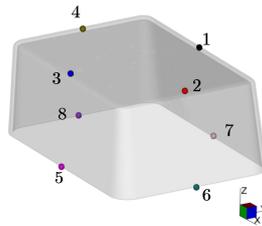
(a) Nós selecionados.			(b) Segmentos selecionados.		
Nó	ID	Coordenada ($x; y; z$)	Segmento	Norma [mm]	Tolerância [mm]
1	14057	0,97; 33,31; 45,00	1-3	66,63	$\pm 0,95$
2	22191	51,15; 0,10; 45,00	2-4	102,65	$\pm 1,40$
3	14036	0,97; -33,31; 45,00	5-7	78,69	$\pm 0,95$
4	187402	-51,50; -0,08; 45,00	6-8	118,69	$\pm 1,40$
5	13907	-0,04; -39,35; 0,00	1-7	45,00	$\pm 0,80$
6	26862	59,35; 0,05; 0,00	2-6	45,00	$\pm 0,80$
7	13961	0,04; 39,35; 0,00	3-5	45,00	$\pm 0,80$
8	826	-59,35; -0,05; 0,00	4-8	45,00	$\pm 0,80$



(a) Vista frontal, definição dos nós.



(b) Vista lateral, definição dos nós.



(c) Vista ortogonal, definição dos nós.

Figura 4.5: Representação da localização dos nós considerados.

Conforme referido pela literatura, quanto mais tempo a peça estiver no interior do molde, menores serão os empenos que ocorrem na peça, algo que se verificou pela análise do Estudo 1 e 2. Um forma de compensar os empenos, é ajustar os perfis de compactação.

Os Estudos 3 e 4, consistiram meramente na definição dos perfis de compactação. O AMI[®], no que concerne o controlo de manutenção, permite definir este parâmetro de diversas maneiras, sendo que foi escolhido definir a duração e o valor da pressão. Kazmer [7] considera que a pressão de compactação deve ser um valor compreendido entre 50 a 90% da pressão de injeção.

Os perfis de compactação considerados nos Estudos 3 e 4 estão apresentados na Tabela 4.8. Foram utilizados perfis de pressão decrescentes ao longo da etapa, visto que a geometria da peça carece de valores de pressão superiores após a fase de enchimento e valores de pressão mais baixos no final da etapa de compactação.

Os deslocamentos que ocorreram nos segmentos, nos quatro estudos, são apresentados na Tabela 4.9. Relativamente ao estudo 1 e 2 verificou-se que os deslocamentos que ocorreram são consideravelmente diferentes, sendo que as condições de processamento do primeiro estudo proporcionam melhores resultados. Foi possível verificar que os Estudos 3 e 4 apresentam resultados, efetivamente, melhores quando comparados com os Estudo 1 e 2. Permitindo, assim, corroborar o argumento que as condições de processamento, são um fator de grande impacto na qualidade final da peça. Entre o estudo 3 e 4 foi possível verificar melhorias nos resultados, mas de modo geral, não foram significativas ao ponto de analisar mais perfis de compactação. Considerando os perfis do Estudo 4 elaborou-se um estudo DOE, de modo a otimizar as condições de processamento definidas até este ponto. A subsecção que se segue é meramente focada na introdução do método de Taguchi, bem como nos respetivos resultados obtidos no estudo.

Tabela 4.8: Perfis de compactação utilizados no estudo 3 e 4.

	Estudo 3			Estudo 4			
Duração [s]	0	10	5	0	10	5	5
Pressão [%]	90	90	70	90	90	80	70

Tabela 4.9: Deslocamentos nos segmentos, para definição condições de processamento.

Segmento	Estudo 1 [mm]	Estudo 2 [mm]	Estudo 3 [mm]	Estudo 4 [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,26	-1,36	-1,16	-1,10	± 0,95
2-4	-1,78	-1,84	-1,69	-1,66	± 1,40
5-7	0,75	3,37	3,16	3,04	± 0,95
6-8	-1,59	-1,15	-1,10	-1,09	± 1,40
1-7	-0,87	-1,05	-0,99	-0,98	± 0,80
2-6	-0,78	-0,82	-0,78	-0,77	± 0,80
3-5	-0,87	-1,03	-0,97	-0,95	± 0,80
4-8	-0,79	-0,83	-0,79	-0,78	± 0,80

4.2.2 *Design of Experiments* (DOE) – Método de Taguchi

Tal como referido anteriormente, as condições de processamento têm um forte impacto na qualidade final da peça. Assim sendo, a sua otimização é imperativa para a obtenção de peças poliméricas com a melhor qualidade possível. O desenho de experiências (da língua anglo-saxónica *Design of Experiments*), consiste em estudar o comportamento de um sistema utilizando um número mínimo de ensaios. Dentro do conceito do desenho de experiências existem diversos métodos, sendo o de Genichi Taguchi um deles. O método de Taguchi, como ficou conhecido, envolve o uso de arranjos ortogonais para organizar os parâmetros que afetam o processo e os níveis em que eles devem variar. Em vez de serem testadas todas as combinações fatoriais possíveis, este método testa apenas pares de combinações. O número total de ensaios necessários, é dado pela Equação 4.1 [59; 60].

$$N_{\text{total}} = n_1^{k_1} \quad (4.1)$$

No AMI[®] existem vários parâmetros que poderiam ser definidos através da análise DOE, no entanto, tal iria corresponder a inúmeras experiências e a um longo período de processamento. Deste modo apenas foram consideradas três variáveis, a temperatura de injeção, os perfis de pressão e a duração desses mesmos perfis. Tratando-se de três variáveis com três níveis seriam necessários, de acordo com a Equação 4.1, 27 ensaios. Na Tabela 4.10 são apresentados os 27 estudos, Y1 a Y27, com nove linhas (L9). Contudo, adotando a metodologia de Taguchi apenas são necessários 4 estudos. A Tabela 4.11 (L4) são apresentados os estudos e os respetivos parâmetros utilizados na análise.

Tabela 4.10: Matriz exponencial L9.

		Pressão mínima	Pressão média	Pressão máxima
T _{mínima}	Duração mínima	Y1	Y2	Y3
	Duração média	Y4	Y5	Y6
	Duração máxima	Y7	Y8	Y9
T _{média}	Duração mínima	Y10	Y11	Y12
	Duração média	Y13	Y14	Y15
	Duração máxima	Y16	Y17	Y18
T _{máxima}	Duração mínima	Y19	Y20	Y21
	Duração média	Y22	Y23	Y24
	Duração máxima	Y25	Y26	Y27

Tabela 4.11: Tabela de estudos L4.

Estudo [n°]	Temperatura [°C]	Duração [s]				Pressão [%]			
1 (Y1)	205,00	0	8	4	4	85	85	70	55
2 (Y9)	205,00	0	12	6	6	95	95	90	85
3 (Y21)	245,00	0	8	4	4	95	95	90	85
4 (Y25)	245,00	0	12	6	6	85	85	70	55

As características do domínio de cálculo dos quatro estudos correspondem às mesmas apresentadas na Tabela 4.5, visto que apenas se trata de uma etapa de otimização e, como tal, estas não se alteram.

Avaliando os deslocamentos dos nós, utilizando a metodologia utilizada na subsecção anterior, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.12. O Estudo 0 corresponde ao Estudo 4 apresentado na subsecção anterior com as condições de processamento utilizadas como valores médios no estudo DOE. Como é possível verificar, tanto o Estudo 1 como o Estudo 2, onde é utilizada a Temperatura de injeção mais baixa, obtêm-se melhores resultados, especialmente no deslocamento que ocorre no segmento 5-7. Contudo, as condições de processamento utilizadas no Estudo 2 conferem os melhores resultados. Ou seja, para a geometria da peça em questão e para o material polimérico utilizado, temperaturas de injeção menores e perfis de compactação com pressão mais elevada e maior duração proporcionam melhores resultados.

Tabela 4.12: Deslocamentos nos segmentos, otimização das condições de processamento.

Segmento	Estudo 0 [mm]	Estudo 1 [mm]	Estudo 2 [mm]	Estudo 3 [mm]	Estudo 4 [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,10	-1,11	-1,04	-1,18	-1,13	± 0,95
2-4	-1,66	-1,66	-1,58	-1,69	-1,69	± 1,40
5-7	3,04	2,73	2,69	3,61	3,37	± 0,95
6-8	-1,09	-1,16	-1,09	-1,01	-1,06	± 1,40
1-7	-0,98	-0,93	-0,89	-0,98	-0,98	± 0,80
2-6	-0,77	-0,77	-0,74	-0,77	-0,79	± 0,80
3-5	-0,95	-0,97	-0,94	-1,03	-1,03	± 0,80
4-8	-0,78	-0,78	-0,75	-0,79	-0,80	± 0,80

Em suma, as condições de processamento utilizadas nos estudos direcionados para a análise da performance térmica das arquiteturas de controlo de temperatura apresentados nas secções que se seguem estão sumariados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Condições de processamento definidas para os estudos.

Parâmetro				
Temperatura de injeção [°C]	205,00			
Temperatura molde (superfície) [°C]	35,00			
Temperatura fluido [°C]	25,00			
Caudal [l/min]	10,00			
Tempo de enchimento [s]	35,00			
Controlo de manutenção				
• Duração [s]	0	12	6	6
• Pressão [%]	95	95	90	85

4.3 Arquitetura do sistema de controlo de temperatura

Definidos os parâmetros relativos ao domínio de cálculo e definidas as condições de processamento, o estudo centrou-se no SCT da ferramenta moldante. Esta fase foi dividida em três etapas. Numa primeira etapa foi estudado a performance de um SCT que seria normalmente utilizado em contexto industrial em alternativa aos canais conformais. Na segunda etapa de estudos, as regras de projeto apresentadas por Mayer [20] foram utilizadas com o objetivo de comprovar que, com as condições de todo o processo definidas, os canais conformais permitem obter resultados efetivamente melhores quando comparando com a estratégia de controlo de temperatura utilizada na etapa anterior. Na terceira e última etapa, foi proposto uma alternativa às regras de projeto apresentadas por Mayer [20], tendo como base Zöllner [61], onde é possível determinar a relação entre P e $D_{c/cc}$ em função das variações do fluxo calor que ocorrem entre a cavidade e os canais.

4.3.1 Arquitetura convencional

Conforme referido, na metodologia adotada, como termo comparativo seria realizado um estudo numérico avaliando a performance de um SCT que seria usualmente encontrado na indústria para a produção de uma peça com as características geométricas e materiais semelhantes à peça proposta em estudo.

Atualmente, na indústria, existem diversas estratégias que podem ser utilizadas como controlo de temperatura em cavidades profundas. O mais usual é a utilização de palhetas (*baffles*), cascatas (*bubbler*) ou insertos de material com elevada condutividade térmica, normalmente ligas de cobre [7].

Atendendo à geometria da peça e ao material utilizado, a estratégia que se considerou ser mais eficiente foi a utilização de um inserto de alta condutividade térmica, dado que tanto as palhetas e cascatas são normalmente utilizadas para controlar a temperatura de uma forma localizada e não globalmente. Para além disso, visto que o polímero injetado não é reforçado, é possível utilizar um inserto com menor dureza [7].

De acordo com o estudo elaborado por Almeida [3] a introdução de uma linha de água no inserto proporciona melhores resultados, tanto do ponto de vista de qualidade final da peça como de duração do tempo de ciclo. À semelhança desse estudo considerou-se também utilizar uma linha de água passível de ser produzida por processos de manufatura convencionais (*e.g.* maquinagem). Utilizando as regras de projeto apresentadas na secção 2.4, foi dimensionada uma linha com as seguintes características:

- $D = 8,00$; $P = 16,00$; $D_{c/cc} = 16,00$ [mm]

O sistema é constituído por 4 linhas, sendo que duas delas estão maquinadas em ângulo (Angular) de modo a aproximar o centro do canal à cavidade. Na Figura 4.6 é possível visualizar uma representação tridimensional dos respetivos canais.

O recurso a ligas cobre-berílio na indústria de fabrico de moldes de injeção era frequente, visto que, o berílio conferia ao cobre melhores propriedades mecânicas e térmicas [62]. Contudo, tratando-se de um metal tóxico, levou a que este fosse retirado da indústria de moldes e substituído por alternativas como as ligas de cobre-níquel-silício-crómio. Um substituto pertencente a esta família de ligas é o AMPCOLOY[®] 940, este

apresenta uma elevada condutividade térmica e dureza. Como tal, este foi o material considerado neste primeiro estudo. A ficha técnica do mesmo pode ser consultada no Anexo H.

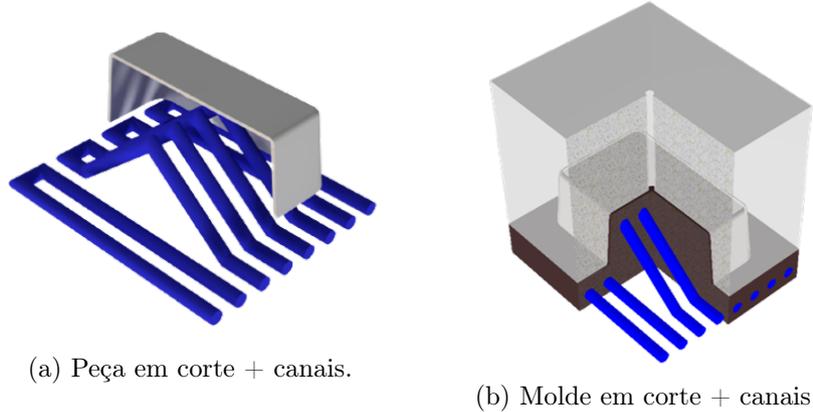


Figura 4.6: Disposição do canal convencional na bucha.

Com os parâmetros definidos na secção do domínio de cálculo (4.1), obtiveram-se as características, presentes na Tabela 4.14, do domínio de cálculo (peça+molde+canais) relativas ao estudo.

Tabela 4.14: Características do domínio de cálculo

Número elementos molde	Número elementos canal	Razão de aspeto		
		Máxima	Média	Mínima
1520037	314691	82,00	3,36	1,04

Aplicando as condições de processamento apresentadas em 4.2.2 e definindo o material da bucha para AMPCOLOY[®] 940: Ampco Metal, presente na base de dados do *software* procedeu-se ao início da análise numérica.

Os resultados genéricos do estudo são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Resultados gerais do canal convencional com bucha de AMPCOLOY[®] 940.

Canal	$t_{\text{extração}}$ [s]	$T_{\text{molde máx}}$ [°C]	ΔT_{canal} [°C]	Nº Reynolds	Perda de carga [MPa]	P_{bombagem} [W]
Linear	19,34	66,11	2,80	26609,80	0,06	10,00
Angular			2,80	26609,90	0,03	6,00

Os deslocamentos dos nós indicados anteriormente, são apresentados na Tabela 4.16.

Foi possível verificar através da análise dos mesmos que apenas em duas cotas as tolerâncias são cumpridas, sendo que as respetivas cotas são simétricas, o que indica que a peça apresenta empenos simétricos, algo que se pode verificar também através do deslocamento no segmento 1-5 e 3-7. Relativamente ao segmento 5-7, maior dimensão

da peça, verificou-se que a diferença entre o deslocamento e a tolerância é consideravelmente superior, pois devido à impossibilidade de aproximação da linha a essas faces o molde está a uma temperatura mais elevada. Pelo que, conseqüentemente, existe uma heterogeneidade térmica no molde, afetando deste modo a qualidade final da peça.

Tabela 4.16: Deslocamentos nos segmentos do estudo convencional.

Segmento	$\Delta D_{\text{convencional}}$ [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,04	$\pm 0,95$
2-4	-1,58	$\pm 1,40$
5-7	1,56	$\pm 0,95$
6-8	-1,54	$\pm 1,40$
1-7	-0,86	$\pm 0,80$
2-6	-0,72	$\pm 0,80$
3-5	-0,85	$\pm 0,80$
4-8	-0,72	$\pm 0,80$

4.3.2 Arquitetura conformal – Regras de projeto

Passando ao objetivo lato desta dissertação iniciou-se o processo de dimensionamento e análise do SCT conformal através das regras de projeto de Mayer [20]. O autor apresenta as regras tendo como base as propriedades reológicas do polímero ajustadas às limitações do processo de DMLS. Dada a vasta gamas de valores e combinações possíveis nos valores de D , P e $D_{c/cc}$ optou-se por se analisar o canal de menor diâmetro (4 mm) visto que é o canal que permite maior aproximação entre a cavidade e o centro do canal, algo que, de acordo com a literatura, favorece o controlo de temperatura. Também se efetuou um estudo utilizando o diâmetro máximo (8 mm) visto que corresponde ao diâmetro calculado no subsecção 3.4.4. Para além destes estudos, foi ainda realizado um estudo numérico com um canal com diâmetro de 6 mm, dado que, Feng [12] considera que para processos de MA com recurso a pós metálicos, o diâmetro mínimo é de 6 mm, pois após a sinterização é extremamente difícil retirar do interior do canal o pó não sinterizado.

O propósito destes estudos é comprovar se efetivamente a performance térmica e conseqüentemente a qualidade final da peça melhorava de modo geral com a aplicação de canais conformais comparativamente ao estudo convencional apresentado anteriormente.

Os canais apresentam as seguintes dimensões:

- $D = 4,00$; $P = 8,00$; $D_{c/cc} = 6,00$ [mm] – apresentado como estudo 4-6-8
- $D = 6,00$; $P = 12,00$; $D_{c/cc} = 9,00$ [mm] – apresentado como estudo 6-12-9
- $D = 8,00$; $P = 16,00$; $D_{c/cc} = 12,00$ [mm] – apresentado como estudo 8-16-12

Após a discretização do domínio de cálculo seguindo a metodologia descrita anteriormente, as características do domínio de cálculo, dos respetivos estudos, encontram-se apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Domínio de cálculo do estudo, canais de conformais de Mayer [20].

Canal	Número elementos molde	Número elementos canal	Razão de aspeto		
			Máxima	Média	Mínima
4-8-6	1336529	2507506	75,10	7,90	1,00
6-12-9	1261926	376043	98,37	3,93	1,05
8-16-12	1343655	307125	99,75	3,73	1,03

Impondo as condições de processamento apresentadas em subsecção 4.2.2, obtiveram-se os resultados gerais na Tabela 4.18. Na Tabela 4.19 é possível consultar os deslocamentos dos nós dos três estudos realizados.

Tabela 4.18: Resultados gerais dos canais conformais de acordo com Mayer [20].

Canal	$t_{\text{extração}}$ [s]	$T_{\text{molde máx}}$ [°C]	ΔT_{canal} [°C]	Nº Reynolds	Perda de carga [MPa]	P_{bombagem} [W]
4-8-6	20,53	75,69	2,72	53547,40	2,65	441,00
6-12-9	20,79	76,82	2,25	35698,30	0,53	89,00
8-16-12	21,03	77,58	2,60	26618,00	0,11	18,00

Os resultados relativos ao SCT, apresentados na Tabela 4.18, permitem verificar que comparativamente com o estudo convencional, o tempo para que a temperatura de extração seja atingida é efetivamente superior. Contudo, no caso dos canais 4-8-6 e 6-12-9 o número de Reynolds é consideravelmente superior, visto que o diâmetro é inferior ao diâmetro utilizado no estudo convencional, podendo ser este um fator indicativo do fluxo de calor transferido por convecção ser superior, em ambos os casos.

Tabela 4.19: Resultados de deslocamento dos estudos de Mayer [20].

Segmento	ΔD_{4-8-6} [mm]	ΔD_{6-12-9} [mm]	$\Delta D_{8-16-12}$ [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,04	-1,04	-1,04	$\pm 0,95$
2-4	-1,58	-1,59	-1,59	$\pm 1,40$
5-7	2,69	2,54	2,17	$\pm 0,95$
6-8	-1,09	-1,18	-1,31	$\pm 1,40$
1-7	-0,89	-0,91	-0,89	$\pm 0,80$
2-6	-0,74	-0,75	-0,74	$\pm 0,80$
3-5	-0,94	-0,91	-0,89	$\pm 0,80$
4-8	-0,75	-0,74	-0,73	$\pm 0,80$

Avaliando os deslocamentos nos segmentos (Tabela 4.19), é possível verificar que estes são relativamente semelhantes, à exceção do segmento 5-7 e 6-8, sendo que essa diferença verifica-se nos três canais. Comparando os valores desses segmentos nos três estudos

é possível verificar que, quanto maior o deslocamento no segmento 5-7 menor será o deslocamento no segmento 6-8, tendo como explicação a elevada contração volumétrica que o PEAD apresenta ($\approx 2,5\%$).

Relativamente aos deslocamentos correspondentes à cota Z da peça, (1-7, 2-6, 3-5, 4-8) é possível verificar um comportamento simétrico, em cotas opostas, contudo, não se verifica um comportamento uniforme, ou seja, nos três estudos o deslocamento que ocorre nos segmentos 2-6 e 4-8 é inferior ao deslocamento dos segmentos 1-7 e 3-5. Podendo esta discrepância de valores ser explicada por uma ligeira heterogeneidade térmica causada pela respetiva geometria do canal. Conforme referido, a entrada do fluido de permuta na bucha ocorre no centro, sendo posteriormente guiada pelo quarto quadrante (Q4) da peça. Como tal, a bucha encontra-se tendencialmente a uma temperatura inferior quando comparando com outras regiões na mesma.

Na Figura 4.7 está ilustrado a divisão da peça em quadrantes, para facilitar a análise de resultados.

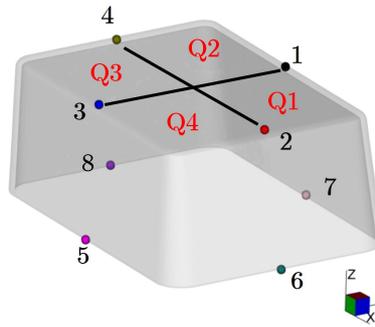


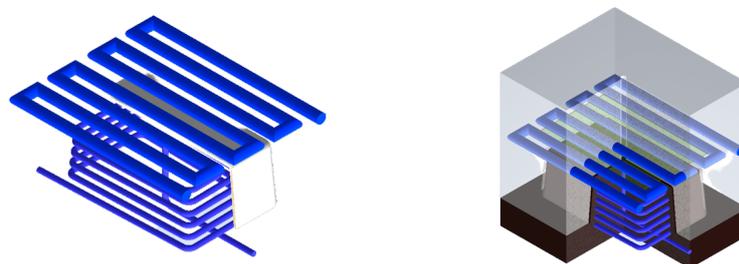
Figura 4.7: Peça dividida em quadrantes relativamente à cota (0,0,45).

Por último, comparando os deslocamentos na base e na extremidade da peça é possível verificar que esta empena em torno do eixo X, devido a tensões residuais provenientes de um arrefecimento diferencial. Através destes resultados é possível concluir que a peça consolida primeiro na extremidade e gradualmente ao longo da cota Z da mesma, sendo que a base da peça consolida depois das paredes, significando que a temperatura é superior na zona da cavidade do molde.

Tendo em conta os resultados e as considerações feitas, considerou-se que uma forma de reduzir a heterogeneidade térmica no molde e consequentemente melhorar a qualidade final da peça, seria a colocação de um canal localizado na cavidade. Como tal foram consideradas as mesmas geometrias de canais conformais utilizadas nos estudos apresentados, sendo que foi adicionado um canal na cavidade atendendo às regras de projeto apresentadas na subsecção 3.4.4. Atendendo a esses valores dimensionou-se um canal linear na cavidade com as seguintes dimensões:

- $D = 8,00$; $P = 16,00$; $D_{c/cc} = 16,00$ [mm]

Na Figura 4.8 está representado o respetivo molde com o canal na cavidade e com o canal conformal na bucha. De notar que o material da bucha continua a ser considerado o aço Maraging[®] 18Ni300 e no molde o aço AISI P20. Visto que o canal dimensionado na bucha é possível de ser obtido por processos de manufatura convencionais.



(a) Peça em corte + canais.

(b) Molde em corte + canais.

Figura 4.8: Disposição do canal conformal na bucha e convencional na cavidade.

Deste modo, era expectável que esta alteração proporcionasse melhorias na qualidade final da peça quando comparando com os resultados apresentados anteriormente.

Seguindo a metodologia utilizada anteriormente, após a discretização do domínio de cálculo, a malha dos respetivos estudos apresentava as características presentes na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Domínio de cálculo dos estudos conformais com canal na cavidade.

Canal (bucha+cavidade)	Número elementos molde	Número elementos canais	Razão de aspeto		
			Máxima	Média	Mínima
4-8-6	1739852	2828366	86,23	7,34	1,00
6-12-9	1704311	737184	73,07	3,76	1,04
8-16-12	1803741	618534	99,93	3,76	1,04

Relativamente aos resultados gerais, os mesmos podem ser consultados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21: Resultados gerais dos canais conformais c/ canal na cavidade.

Canal ²	$t_{\text{extração}}$ [s]	$T_{\text{molde máx}}$ [°C]	ΔT_{canal} [°C]	Nº Reynolds	Perda de carga [MPa]	P_{bombagem} [W]
4-8-6	18,37	54,25	2,14	53547,40	2,81	469,00
				26683,40	0,16	27,00
6-12-9	18,65	58,91	1,82	35698,30	0,55	93,00
				26683,40	0,16	27,00
8-16-12	18,61	60,80	2,25	26618,30	0,12	19,00
				26683,40	0,16	27,00

² Nas colunas correspondentes ao N^o de Reynolds, Perda de carga e P_{bombagem} , o primeiro valor de cada linha é referente ao canal conformal e o segundo ao canal na cavidade.

Pelos dados apresentados pode-se verificar que a adição de um canal na cavidade permite que o tempo para que a temperatura de extração seja atingida mais rapidamente, cerca de 10% mais rápido, quando comparado com os estudos em que é apenas utilizado

o canal conformal na bucha. A temperatura máxima registada no molde durante o ciclo também sofre uma redução considerável, pelo que se justifica a redução do tempo requerido para que a temperatura de extração seja atingida.

Analisando agora os deslocamentos que ocorreram nos segmentos, apresentados na Tabela 4.22, é possível concluir que de modo geral a colocação de um canal linear na cavidade proporciona efetivamente uma melhoria na qualidade final da peça. Sendo possível verificar-se que, independente do estudo em análise, os deslocamentos começam a tender para um determinado valor, à exceção do deslocamento que ocorre no segmento 5-7 e 6-8, visto que correspondem às maiores dimensões na peça. Analisando os segmentos que correspondem à profundidade da peça, 1-7, 2-6, 3-5 e 4-8 verifica-se que os deslocamentos que ocorrem continuam a ser simétricos, à semelhança do estudo anterior, e estes encontram-se abaixo da tolerância imposta para a cota em questão, o que permite concluir que o empeno que ocorria em torno do eixo X, diminuiu com a adição do canal. Para além disso, no caso do canal 4-8-6 o deslocamento que ocorre no segmento 5-7 é também inferior à tolerância imposta.

Tabela 4.22: Resultados de deslocamento dos estudos c/ canal na cavidade.

Segmento	ΔD_{4-8-6} [mm]	ΔD_{6-12-9} [mm]	$\Delta D_{8-16-12}$ [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,00	-1,00	-1,00	$\pm 0,95$
2-4	-1,56	-1,57	-1,57	$\pm 1,40$
5-7	-0,75	-1,27	-1,46	$\pm 0,95$
6-8	-1,66	-1,80	-1,89	$\pm 1,40$
1-7	-0,70	-0,67	-0,66	$\pm 0,80$
2-6	-0,71	-0,70	-0,70	$\pm 0,80$
3-5	-0,71	-0,69	-0,68	$\pm 0,80$
4-8	-0,69	-0,69	-0,69	$\pm 0,80$

Com a análise dos estudos dos canais conformais sem a introdução do canal na cavidade, foi concluído que a utilização de diâmetros superiores proporciona, na generalidade, melhores resultados na qualidade final da peça. Contudo, com a adição do canal na cavidade o comportamento do polímero alterou-se, sendo que agora com a utilização de diâmetros menores de canal (4-8-6) atinge-se melhores resultados. Pelo que é necessário avaliar a temperatura ao longo da espessura da peça de modo a verificar se existe uniformidade térmica quando comparado com as restantes configurações.

A temperatura ao longo da espessura da peça foi analisada em pontos específicos, sendo que, numa primeira fase, foram selecionados oito pontos na base da peça, visto que se pretendia avaliar a influência da introdução do canal na cavidade. Os pontos considerados estão indicados na Tabela 4.23 e a localização dos mesmos está representado na Figura 4.9.

Tabela 4.23: Nós considerados na análise da temperatura ao longo da espessura da peça.

Nó	ID	Coordenada ($x; y; z$)
1	14057	0,97; 33,31; 45,00
2	22191	51,15; 0,10; 45,00
3	14036	0,97; -33,31; 45,00
4	187402	-51,50; -0,08; 45,00
9	13923	-0,03; 14,26; 45,00
10	13914	25,52; 0,11; 45,00
11	187482	-0,05; -16,82; 45,00
12	17243	-26,02; 0,41; 45,00

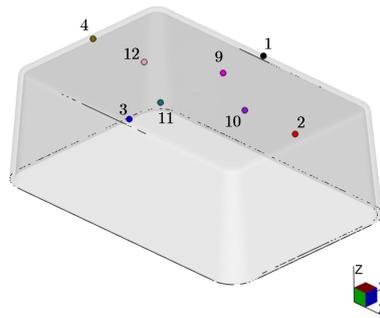


Figura 4.9: Localização dos nós considerados para a análise da temperatura.

Foram criados gráficos, que podem ser consultados em J, K e L, para todos os estudos apresentados. De forma a facilitar a análise, apenas foram considerados os nós 1 e 4 visto que correspondem ao quadrante oposto aquele que se encontra a uma temperatura mais baixa conforme já referido anteriormente. Os valores de temperatura foram retirados no mesmo instante, 40,00 s, ou seja, 5,00 s após a abertura do molde conforme definido nas condições de processamento impostas.

O respetivo gráfico, ilustrado na Figura 4.10, numa primeira análise, permite concluir que a inclusão de um canal na cavidade permite reduzir a temperatura que se regista na superfície da peça do lado da cavidade em cerca de 30°C. Tornando deste modo a diferença entre a temperatura registada à superfície da peça do lado da cavidade e da bucha menor. Conforme se confirmou pelos valores da Tabela 4.22, o estudo 4-8-6 com canal na cavidade foi a estratégia de SCT que proporcionou melhores resultados, que podem ser efetivamente justificados pela temperatura à face da espessura externa ser relativamente semelhante à temperatura registada na face interna da peça. De realçar que a adição da canal da cavidade não interfere com a performance do canal conformal na bucha, ou seja, este não se encontra sobre-dimensionado. Analisando as curvas de ambos os estudos relativos à geometria 4-8-6 verifica-se que no lado da bucha as temperaturas são relativamente semelhantes.

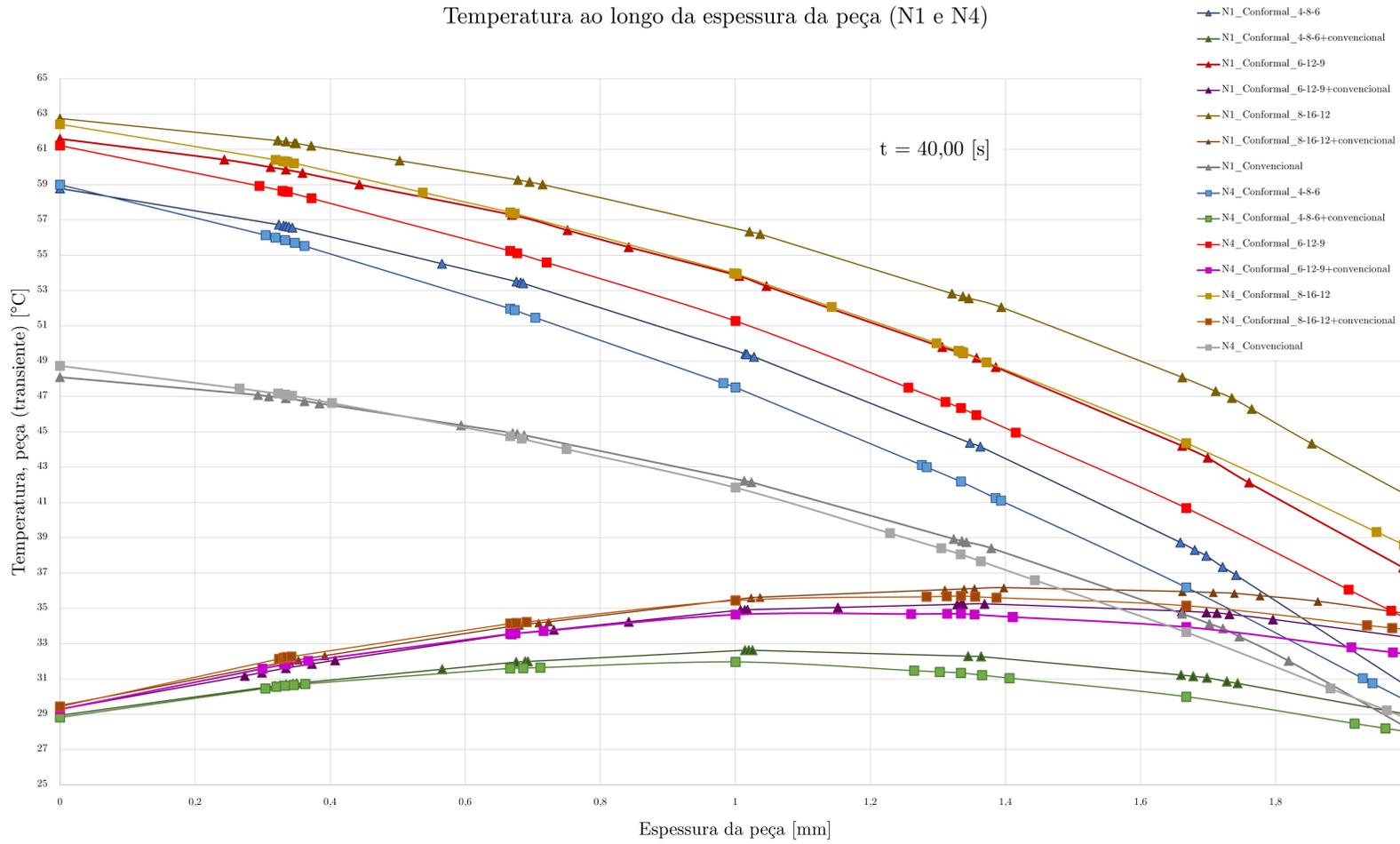


Figura 4.10: Temperatura ao longo da espessura na peça, nos nós 1 e 4.

4.3.3 Arquitetura conformal – Novas propostas

A proposta apresentada por Mayer [20] revelou, como os resultados apresentados na subsecção anterior comprovam, que os canais conformais permitem garantir uma melhoria da qualidade final na peça quando comparando a estratégia convencional apresentada na subsecção 4.3.1. Contudo, conforme referido, as regras de projeto estão adaptadas ao processo de fabrico DMLS, pelo que estas se encontram restritas às limitações do processo.

Zöllner [61], referência de Mayer [20], apresenta regras para o dimensionamento de SCT baseadas nas propriedades reológicas dos polímeros. O fundamento base é relacionado com a uniformidade do fluxo de calor que ocorre entre a cavidade e os canais. Analisando o fluxo de calor, bidimensionalmente, é possível verificar que este é variável ao longo da superfície da cavidade, como demonstrado pela Figura 4.11. Como tal, existirão na bucha variações de temperatura, que terão impacto na qualidade final da peça. Zöllner [61], apresenta um modelo matemático que permite calcular a diferença entre esses valores, sendo que o mesmo também apresenta valores limite para essa variação/erro (%) de modo a garantir que as propriedades reológicas não são afetadas. Para polímeros semi-cristalinos é aconselhado que esse erro esteja compreendido entre 2,5 e 5,0%, já para polímeros amorfos o valor deve estar entre 5 e 10%. A Equação 4.2 permite calcular o respetivo erro, sendo que esta relaciona o número de Biot e a relação entre o passo e a distância entre a cavidade e o centro do canal.

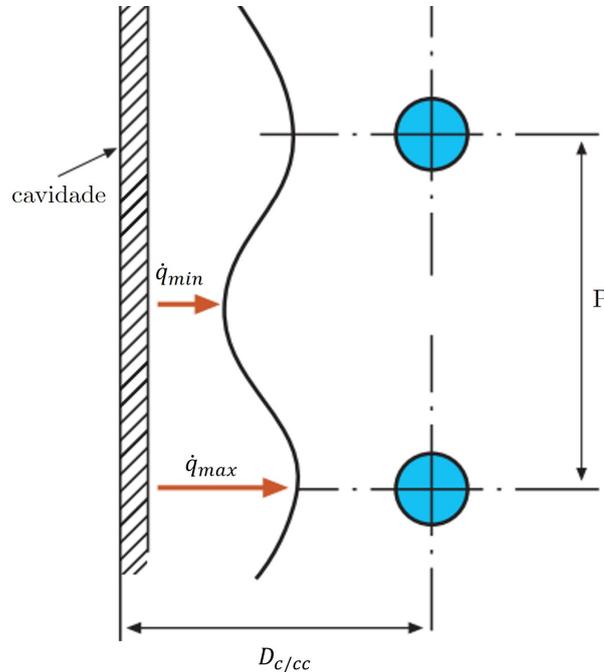


Figura 4.11: Variação de calor em torno do calor, adaptado de [61].

$$j = 2,4 \times Bi^{0,22} \times \left(\frac{P}{D_{c/cc}} \right)^{2,8 \times \ln \left(\frac{P}{D_{c/cc}} \right)} \quad (4.2)$$

O número de Biot, expresso pela Equação 4.3, é um parâmetro adimensional que corresponde à razão entre o coeficiente de transferência por convecção de um corpo à sua superfície e a condutividade térmica desse corpo.

$$Bi = \frac{h \times D}{\lambda} \quad (4.3)$$

Para a determinação do número de Biot é necessário o coeficiente de convecção que, no que lhe concerne, pode ser determinado com o auxílio do gráfico apresentado por Zöllner [61], representado na Figura 4.12, pelo que é necessário assumir um valor para o diâmetro do canal e um caudal. O autor em questão, na sua publicação, apresenta diferentes gráficos consoante a temperatura da água que escoa no interior do canal. Uma vez que se definiu a temperatura para 25°C, considerou-se o gráfico com a temperatura de 20°C por ser o valor mais próximo, para ser possível estabelecer parâmetros de comparação.

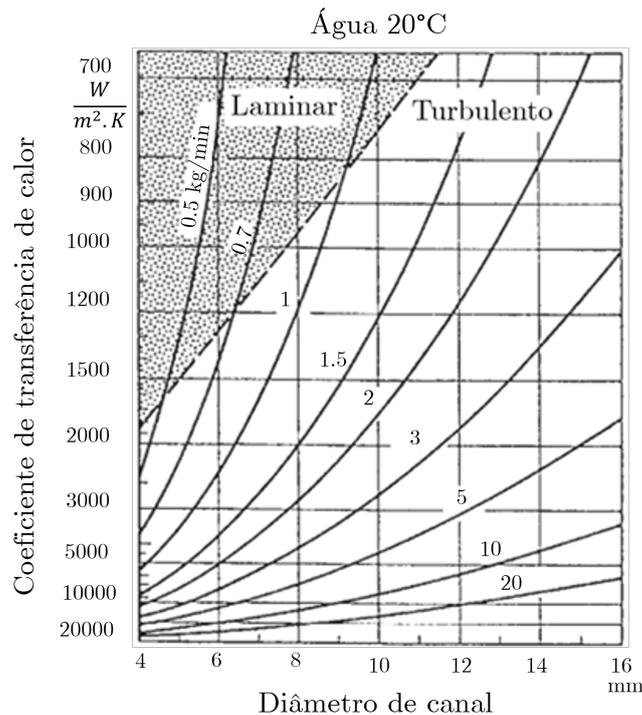


Figura 4.12: Coeficiente de transferência de calor para água a 20°C, adaptado de [61].

Deste modo considerou-se elaborar uma série de estudos tendo como base estas regras de projeto térmico ajustadas ao processo de fabrico SLM. O polímero em utilização (PEAD) é semi-cristalino pelo que, o valor de j deverá corresponder a 2,50%, de forma a reduzir as variações de fluxo de calor, respeitando o limite imposto.

Consideraram-se os diâmetros de 4,00 mm e de 6,00 mm, visto que o primeiro apresentou melhores resultados e o segundo representa o diâmetro mínimo para garantir que o pó não sinterizado do processo de MA é totalmente removido de dentro do canal [12].

Para os diâmetros mencionados, analisando o gráfico representado na Figura 4.12 e considerando um caudal de 10 l/min obtêm-se os coeficientes de transferência apresenta-

dos na Tabela 4.24. O valor da condutividade térmica do Maraging 18Ni300 considerado foi de 25 W/m.K, presente no Anexo I.

Tendo os parâmetros definidos é possível obter a relação entre o passo (P) e a distância entre a cavidade e o centro do canal ($D_{c/cc}$) através da Equação 4.2. Os respetivos valores podem também ser consultados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: Constantes para cálculo e respetivas relações de $\frac{P}{D_{c/cc}}$ para os diâmetros considerados.

Diâmetro [mm]	h [W/m ² .K]	λ [W/m.k]	Bi	$\frac{P}{D_{c/cc}}$
4,00	500000,00	25,00	80,00	0,563
6,00	30000,00	25,00	7,20	0,687

Através da razão $\frac{P}{D_{c/cc}}$ é possível definir a arquitetura do SCT. Segundo Kruth [47], o processo SLM permite espessuras de parede de 1 mm, pelo que se definiu que a espessura da parede entre dois canais consecutivos seria de 1 mm para qualquer diâmetro utilizado. Para além do passo, seria também possível definir como 1 mm a distância entre a superfície da cavidade e do canal, o que do ponto de vista térmico seria mais benéfico, segundo a literatura, visto que o canal se encontrava mais próximo da cavidade todavia, é necessário salvaguardar a durabilidade da bucha, uma vez que se trata de um processo cíclico com elevadas solicitações mecânicas e a proximidade do canal à superfície pode comprometer a integridade estrutural da bucha. A Figura 4.13 ilustra esquematicamente a disposição dos canais relativamente à cavidade e entre si, conforme referido anteriormente.

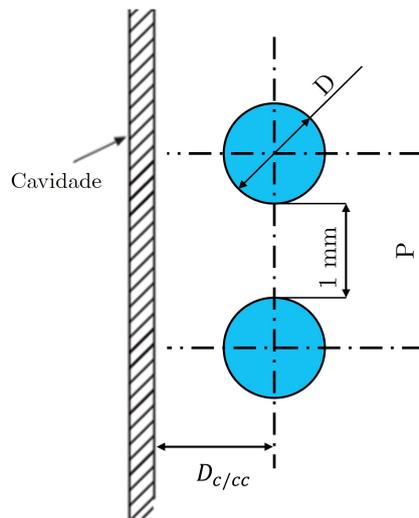


Figura 4.13: Disposição dos canais adaptado ao processo de FSL.

Deste modo, os valores da disposição do canal considerados no estudo são:

- $D = 4,00$; $P = 5,00$; $D_{c/cc} = 9,00$ [mm] – apresentado como estudo 4-5-9
- $D = 6$; $P = 7,00$; $D_{c/cc} = 10,00$ [mm] – apresentado como estudo 6-7-10

O dimensionamento dos respetivos canais foi feito seguindo a metodologia apresentada na secção 4.3.2. Todas as estratégias de SCT aqui analisadas tiveram em consideração a utilização de um canal na cavidade, uma vez que tal se revelou interessante do ponto de vista térmico. Relativamente ao domínio de cálculo as características da malha são apresentadas na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Domínio de cálculo dos estudos conformais alternativos com canal na cavidade.

Canal (bucha+cavidade)	Número elementos molde	Número elementos canais	Razão de aspeto		
			Máxima	Média	Mínima
4-5-9	1799724	5018229	99,55	10,59	1,01
6-7-10	1756667	1015589	71,22	4,00	1,03

Na Tabela 4.26 podem ser consultados os resultados obtidos, no que concerne carga térmica no molde e dinâmica de escoamento do fluido de permuta, nos estudos realizados. Como se pode verificar, quando utilizada a geometria 6-7-10 o tempo para a extração é ligeiramente menor que a geometria 4-5-9, o mesmo se verifica para a temperatura máxima do molde. Contudo, é necessário salientar que a perda de carga induzida no canal é relativamente elevada, o que se traduz numa potência de bombagem superior. Apesar de o diâmetro ser o mesmo, o tamanho da linha é maior na geometria 4-5-9 o que faz com que as perdas de carga sejam maiores.

Tabela 4.26: Resultados gerais dos canais conformais alternativos com canal na cavidade.

Canal ³	$t_{\text{extração}}$ [s]	$T_{\text{molde máx}}$ [°C]	ΔT_{canal} [°C]	Nº Reynolds	Perda de carga [MPa]	P_{bombagem} [W]
4-5-9	18,52	55,58	1,54	53547,40	3,80	634,00
				26683,40	0,16	27,00
6-7-10	18,32	55,18	1,84	35698,30	0,95	160,00
				26683,40	0,16	27,00

³ Nas colunas correspondentes ao Nº de Reynolds, Perda de carga e P_{bombagem} , o primeiro valor de cada linha é referente ao canal conformal e o segundo ao canal na cavidade.

Os deslocamentos, para avaliação da qualidade final da peça, foram analisados de acordo com a metodologia utilizada nas secções anteriores, e encontram-se apresentados na Tabela 4.27.

Comparando ambos os estudos apresentados, verifica-se que, de um modo geral, os deslocamentos são relativamente semelhantes, com a exceção do segmento 5-7 em que a geometria 6-7-10 apresenta resultados efetivamente melhores. Analisando estes resultados com os apresentados na secção 4.3.2, na generalidade, verifica-se uma certa tendência de valores, ou seja, analisando o segmento 1-3 nos estudos verifica-se que o valor do deslocamento corresponde a 1 mm ou a um valor próximo deste. Pelo que se pode concluir que independentemente da geometria do SCT irão sempre ocorrer determinados deslocamentos associados à contração volumétrica natural do respetivo polímero.

Tabela 4.27: Resultados de deslocamento dos estudos conformais alternativos c/ canal na cavidade e estudos c/ canal cavidade segundo as regras de Mayer [20].

Segmento	ΔD_{4-5-9} [mm]	ΔD_{6-7-10} [mm]	ΔD_{4-8-6} [mm]	ΔD_{6-12-9} [mm]	$\Delta D_{8-16-12}$ [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	$\pm 0,95$
2-4	-1,57	-1,57	-1,56	-1,57	-1,57	$\pm 1,40$
5-7	-1,02	-0,89	-0,75	-1,27	-1,46	$\pm 0,95$
6-8	-1,78	-1,78	-1,66	-1,80	-1,89	$\pm 1,40$
1-5	-0,69	-0,70	-0,70	-0,67	-0,66	$\pm 0,80$
2-6	-0,70	-0,70	-0,71	-0,70	-0,70	$\pm 0,80$
3-7	-0,70	-0,71	-0,71	-0,69	-0,68	$\pm 0,80$
4-8	-0,69	-0,70	-0,69	-0,69	-0,69	$\pm 0,80$

Analisando os valores relativos à geometria 4-5-9 e comparado com os da geometria 4-8-6 verifica-se que, nesta última, são cumpridas mais tolerâncias dimensionais do que utilizando as estratégias alternativas, pelo que se verifica a diferenciação analisando os valores relativos ao segmento 5-7. Contudo, a tolerância não é respeitada por apenas 0,70 mm.

Relativamente à geometria 6-7-10, esta apresenta resultados melhores do que a 4-5-9, algo que não se verificou nos estudos com os mesmos diâmetros (4 e 6) nas regras de Mayer [20]. De notar que o diâmetro de 6 mm foi considerado devido ao facto de a literatura considerar que este deveria ser o diâmetro mínimo quando utilizando processos de MA que recorrem à sinterização de pós, visto que o pó não sinterizado em diâmetro menores incorre no risco de entupir o canal, impossibilitando a remoção deste. Pelo que, em suma, obtiveram-se resultados semelhantes aos obtidos no estudo que apresentou melhores resultados (4-8-6) e o processo de fabrico da bucha é mais fácil visto que o diâmetro do canal é superior. Para além disso, sendo um diâmetro superior, a pressão de bombagem requerida é consideravelmente menor, conforme apresentado na Tabela 4.26, o que se traduz num menor consumo energético pela parte da unidade termoreguladora.

Todos os estudos apresentados até agora tem utilizado como secção transversal do canal um perfil circular. No entanto, conforme apresentado na literatura outras geometrias têm sido consideradas, sendo que a utilização de perfis retangulares representaram melhores resultados de acordo com o estudo de Jaham [27] e de Altaf e Rani [28]. Segundo os autores, esta geometria apresentou melhores resultados por ter uma proximidade maior entre a cavidade e a superfície do canal, conforme demonstrado pela Figura 2.10. Deste modo, foram elaborados estudos utilizando perfis retangulares/quadrangulares.

Conforme foi possível verificar, o canal 4-8-6 e o 6-7-10 foram as configurações que proporcionaram melhores resultados, como tal, utilizando a mesma disposição (P e $D_{c/cc}$) e diâmetros hidráulicos equivalentes procedeu-se ao dimensionamento dos respetivos canais. Para efeito de cálculo, foi considerada a Equação 4.4.

$$D_h = \frac{4 \times \text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (4.4)$$

No caso do canal com 4 mm de diâmetro, o diâmetro equivalente para um geometria

retangular requeria que o canal tivesse 6 mm de comprimento e 3 mm de largura, no caso do canal circular com 6 mm de diâmetro o diâmetro hidráulico equivalente seria de um perfil de 6 mm de comprimento por 6 mm de largura tornando assim num perfil quadrangular. Em suma, as dimensões gerais são:

- $D_h = 4,00$; $P = 8,00$; $D_{c/cc} = 6,00$ [mm] – apresentado como estudo 6@3-8-6.
- $D_h = 6,00$; $P = 7,00$; $D_{c/cc} = 10,00$ [mm] – apresentado como estudo 6@6-7-10.

Aos respetivos canais foram adicionados chanfros de 1 mm (Figura 4.14), visto que no processo de MA ângulos superiores a 45° representam complicações ao processo de produção. Os respetivas dimensões foram ajustadas de modo a garantir que o diâmetro hidráulico permanecia igual aos considerados.

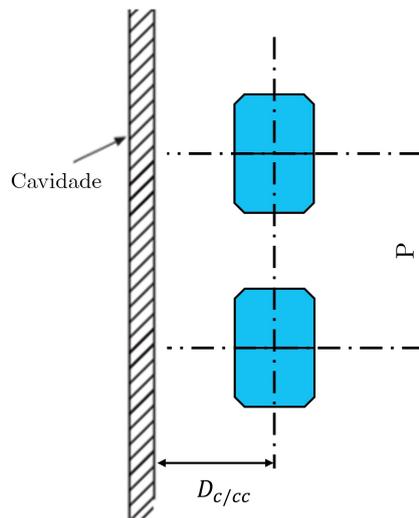


Figura 4.14: Configuração dos canais retangulares/quadradangulares.

Adotando o procedimento utilizado nas secções anteriores, as características do domínio de cálculo dos estudos são apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28: Domínio de cálculo dos estudos conformais retangulares/quadradangulares com canal na cavidade.

Canal (bucha+cavidade)	Número elementos molde	Número elementos canais	Razão de aspeto		
			Máxima	Média	Mínima
6@3-8-6	2137949	842238	98,10	3,86	1,04
6@6-7-10	1722638	775194	67,03	3,82	1,03

Comparando os resultados gerais dos respetivos estudos presentes na Tabela 4.29 e comparando com os estudos 4-8-6 e 6-7-10, de secção circular, são notáveis algumas divergências.

Tabela 4.29: Resultados gerais dos canais conformais retangulares/quadrangulares c/ canal na cavidade.

Canal ⁴	$t_{\text{extração}}$ [s]	$T_{\text{molde máx}}$ [°C]	ΔT_{canal} [°C]	Nº Reynolds	Perda de carga [MPa]	P_{bombagem} [W]
6@3-8-6	18,26	54,25	2,14	43721,30	1,70	283,00
				26683,40	0,16	27,00
6@6-7-10	18,50	56,87	2,15	33315,70	0,58	97,00
				26683,40	0,16	27,00

⁴ Nas colunas correspondentes ao Nº de Reynolds, Perda de carga e P_{bombagem} , o primeiro valor de cada linha é referente ao canal conformal e o segundo ao canal na cavidade.

No caso do estudo 6@3-8-6 verifica-se que a perda de carga induzida no fluido é menor que no estudo 4-8-6, no entanto, seria expectável que se verificasse o oposto, visto que a geometria circular é aquela que proporciona melhores condições de escoamento num fluido Newtoniano. Conforme ilustrado pela Figura 4.15a, verifica-se o aparecimento de uma zona de re-circulação devido a alterações geométricas no meio de escoamento do fluido (aumento da velocidade *in situ* seguida de uma diminuição da mesma). Como tal, o aparecimento deste faz com que haja alterações no regime de escoamento e, por inerência, na taxa de transferência de calor, influenciando a performance térmica do molde com esta geometria. O respetivo fenómeno não é tão notório na geometria 6@3-8-6.

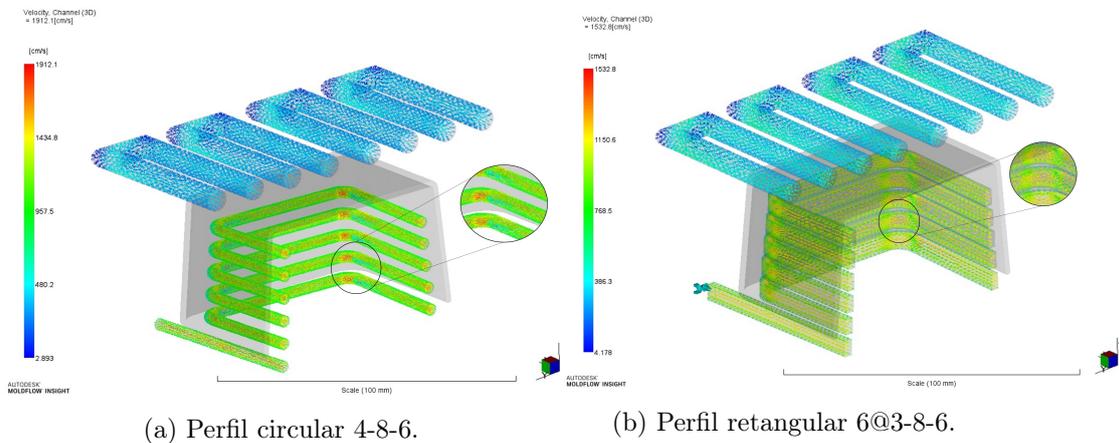


Figura 4.15: Velocidade de escoamento nos estudos 4-8-6 e 6@3-8-6.

Relativamente à geometria 6@6-7-10, e comparando com o estudo 6-7-10, o fenómeno referido anteriormente também se verifica nestas geometrias, apesar de não ser tão preponderante. Valores de perda de carga menores, são uma mais-valia visto que a pressão de bombagem requerida é menor, tornando assim os custos energéticos menores.

Comparando os quatro estudos, verifica-se que a variação de temperatura nos canais é relativamente superior nas geometrias retangulares/quadrangulares, podendo ser um indicador que mais carga térmica foi removida por este tipo de canais. No sentido de averiguar se de facto foi removida mais carga térmica, proceder-se-á à avaliação da temperatura ao longo da espessura, como realizado nas análises efetuadas nas secções

anteriores.

Quanto à qualidade final da peça, avaliando os deslocamentos registados (Tabela 4.30) e utilizando a mesma metodologia adotada anteriormente, verifica-se que a geometria 6@3-8-6 proporciona melhores resultados que a geometria 6@6-7-10. Em concreto, a geometria retangular com um diâmetro hidráulico de 4 mm apresenta melhores resultados que a geometria circular visto que o deslocamento no segmento 5-7 é efetivamente menor.

Relativamente à geometria do estudo 6@6-7-10 e comparando com a geometria 6-7-10 os resultados não são tão aliantes, tendo em conta que alguns dos deslocamentos avaliados não respeitam as tolerâncias dimensionais. Contudo, tendo em consideração os resultados da geometria 4-8-6 verifica-se que os resultados obtidos no estudo utilizando a geometria 6@3-8-6 são melhores.

Tabela 4.30: Resultados de deslocamento dos estudos conformais retangulares/quadrangulares c/ canal na cavidade.

Segmento	$\Delta D_{6@3-8-6}$ [mm]	$\Delta D_{6@6-7-10}$ [mm]	Tolerância [mm]
1-3	-0,99	-1,00	$\pm 0,95$
2-4	-1,56	-1,57	$\pm 1,40$
5-7	-0,59	-1,13	$\pm 0,95$
6-8	-1,60	-1,83	$\pm 1,40$
1-5	-0,72	-0,68	$\pm 0,80$
2-6	-0,69	-0,70	$\pm 0,80$
3-7	-0,71	-0,70	$\pm 0,80$
4-8	-0,71	-0,69	$\pm 0,80$

Na Figura 4.16 é apresentada a evolução da temperatura ao longo da espessura da peça. Uma diferença notória prende-se com a comparação dos resultados do estudo 6-12-9 e 6-7-10 e como se pode verificar existe variação de temperatura na ordem dos 4-5°C no caso de estudo 6-12-9, que induz heterogeneidade térmica a qual prejudica diretamente a qualidade final da peça conforme se verificou nos resultados apresentados nas Tabelas 4.30 e 4.22.

No entanto, como é possível verificar no gráfico da Figura 4.16, o estudo 6@3-8-6 que apresentou deslocamentos menores na peça, apresenta uma diferença de temperatura na ordem dos 2°C, sendo que o lado da bucha se encontra a uma temperatura mais baixa, contrapondo o argumento da homogeneidade térmica requerido no molde. Contudo, como a diferença de temperatura entre o nó 1 e o nó 4 relativos no estudo 6@3-8-6 é efetivamente menor quando comparada com os restantes estudos, pelo que se sugere que a temperatura apesar de ser globalmente menor do lado da bucha é mais homogênea quando comparando pontos localizados. Os gráficos da temperatura ao longo da espessura dos estudos podem ser consultados no Anexo L.

Temperatura ao longo da espessura da peça, arquiteturas alternativas (N1 e N4)

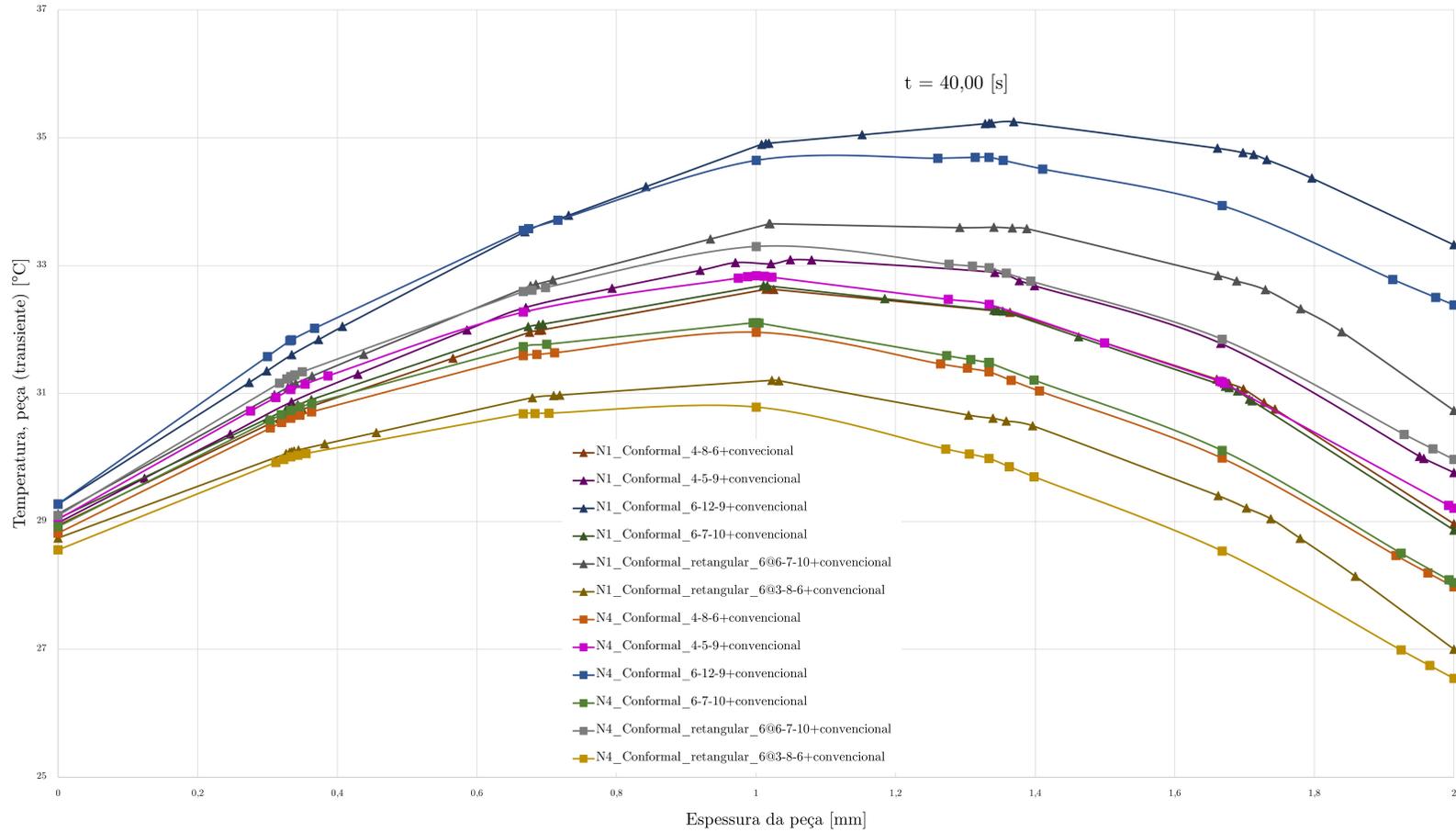


Figura 4.16: Temperatura ao longo da espessura da peça para geometrias alternativas nos nós 1 e 4.

4.4 Discussão geral de resultados

As regras de projeto apresentadas por Mayer [20], como já comprovado diversas vezes em estudos encontrados na literatura, provaram que a sua utilização, para além de proporcionar melhores resultados relativos à qualidade final da peça, é um método que permite reduzir o tempo necessário para ser atingida a temperatura de extração, na generalidade. Comparando o tempo para a extração entre o estudo utilizando a estratégia convencional e o dos canais conformais existe a diferença de aproximadamente 1 s. Nos estudos de Kamarudinet et al. [17] e Jahan et al. [27] a redução do tempo de ciclo foi mais preponderante que nos estudos realizados, todavia, apesar de numa primeira instância a redução de 1 s no tempo de ciclo não parecer um valor significativo, é importante referir que a redução do tempo de ciclo não foi considerada como um fator preponderante na elaboração dos estudos, sendo que a qualidade final da peça foi o principal critério na análise dos resultados e no planeamento das experiências. Para além disso, 1 s corresponde aproximadamente ao tempo necessário para injetar o material polimérico na cavidade, ou seja, numa produção contínua, esta redução temporal irá promover a cadência de produção.

Os estudos efetuados permitiram concluir que a aproximação do canal à cavidade não é um critério preponderante, algo que refuta o pressuposto apresentado pela literatura. Foi possível averiguar que a utilização de geometrias de secção transversal retangular permitem obter resultados em termos de qualidade final da peça efetivamente melhores, corroborando outro pressuposto apresentado pela literatura. Pelo que, não deverá ser atribuído critérios de preponderância a parâmetros específicos. Surgindo assim um pressuposto que durante o processo de dimensionamento de um SCT deverá ser atribuído um carácter de relevância superior à homogeneidade térmica.

A homogeneidade térmica, no que lhe concerne, nesta dissertação, foi avaliada escolhendo dois pontos estrategicamente localizados, e avaliando a evolução da temperatura ao longo da espessura da peça. Esta avaliação permitiu concluir, numa primeira instância, que quando a temperatura entre a face em contacto com a cavidade e a bucha são semelhantes, os resultados obtidos, relativos à qualidade final da peça, são efetivamente melhores. Porém, os resultados obtidos no estudo 6@3-8-6 permitiram contrapor o pressuposto, visto que existe um diferencial de temperaturas entre a cavidade e a bucha. Contudo, analisando a temperatura entre o nó 1 e 4 na face em contacto com a bucha, verifica-se que a diferença de temperaturas é menor quando comparada com os restantes estudos. Ou seja, globalmente existe uma diferença de temperaturas entre a bucha e a cavidade, mas esta diferença é uniforme em diferentes pontos localizados na peça, o que permite que a peça consolide de uma forma mais uniforme.

Em suma, através dos estudos elaborados foi possível definir diretrizes de auxílio ao projeto térmico que permitiram formular uma base científica primitiva que possibilitará a implementação da metodologia em algoritmos dedicados ao dimensionamento automático e generativo de sistemas de controlo de temperatura conformais.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A elaboração desta dissertação iniciou-se com uma revisão bibliográfica que permitiu estabelecer pressupostos tendo por base a consulta de estudos relacionados com o controlo de temperatura em moldes de injeção de material polimérico.

- Dos diversos estudos analisados, verificou-se que a utilização de canais conformais são uma mais-valia para a melhoria de qualidade do processo de moldação por injeção. Para além de ser garantido uma melhoria na qualidade final da peça, também podia ser garantido uma diminuição no tempo de ciclo, visto que os canais conformais permitem a remoção da carga térmica do polímero de uma forma mais rápida e eficaz.
- Verificou-se que era dado principal destaque à geometria da secção transversal do canal, como nos casos de estudos de Saidin et al. [26], Kamarudinet et al. [17] e Jahan et al. [27]. Sendo que também é dado um peso considerável, em termos de dimensionamento, à distância entre a peça e o centro do canal ($D_{c/cc}$).
- O estudo apresentado por Mayer [20] demonstrou ser a base das regras de projeto nos estudos apresentados na literatura, mesmo sendo estas condicionadas pelas limitações do processo de DMLS.
- Para além do dimensionamento paramétrico, o dimensionamento automático, como nos casos de estudo de Wang et al. [37] e Seo-Hyeon et al. [42] revelaram apresentar diversas vantagens no que concerne o dimensionamento de um SCT.

Tendo em conta as considerações e as conclusões apresentadas na literatura, foi delineada uma estratégia de estudos que permitisse:

1. Comprovar que a definição das condições de processamento impostas, são um fator crucial com peso igualmente atribuído ao SCT.
2. Corroborar que os canais conformais apresentam vantagens face à estratégia que seria usualmente utilizada na indústria como SCT na ferramenta moldante.
3. Analisar as regras de projeto apresentadas por Mayer [20], e comparar com outras alternativas que permitissem garantir melhorias na qualidade final da peça.

Para o efeito, e com o objetivo de levar a cabo a estratégia planeada, iniciou-se o estudo com a seleção de uma peça que teve por base uma geometria normalmente utilizada para armazenamento no sector alimentar. Note-se que na escolha no polímero foram tidos em consideração fatores com a toxicidade do polímero, como também se optou por um polímero com baixa estabilidade térmica e dimensional para que a influência do SCT fosse facilmente identificável.

De seguida deu-se início ao estudo numérico, onde a análise do domínio de cálculo, verificou tratar-se de uma etapa crucial em qualquer estudo FEM visto que são possível garantir valores fidedignos utilizando domínios de cálculo menos refinados, o que se traduz em tempos de processamento menores. No que concerne os estudos numéricos idealizados e analisados, foi possível concluir que:

- Relativamente ao estudo convencional, foi considerado um inserto de alta condutividade AMPCOLOY[®] 940, o que proporcionava resultados superiores quando comparando os canais conformais 4-8-6, 6-12-9 e 8-16-12.
- A adição de um canal retilíneo na cavidade permitiu obter melhores resultados que no estudo convencional, visto que este permitia reduzir a heterogeneidade térmica que existia entre a cavidade e a bucha.
- Nos estudos utilizando as regras de projeto de Mayer [20] e o canal na cavidade, os melhores resultados obtidos foram no caso de estudo 4-8-6, favorecendo deste modo o argumento presente na literatura, que os canais mais próximos da cavidade proporcionam melhores resultados. Contudo, sendo um diâmetro muito reduzindo, a pressão de bombagem é consideravelmente superior devido às perdas de carga induzidas no canal, o que se traduz em consumos energéticos mais elevados. Apesar de apresentar uma performance térmica efetivamente superior, existem preocupações relativas ao processo de produção, visto que não é recomendado perfis com diâmetros inferiores a 6 mm em processo de fabrico que recorrem à sinterização de pós metálicos [12].
- As geometrias alternativas dos canais propostas, tendo como base o estudo apresentado por Zöllner [61] e as limitações do processo de SLM, permitiram verificar resultados efetivamente melhores, como se verificou comparando os estudos 6-12-9 e 6-7-10.
- Relativamente às geometrias não circulares foram propostos dois estudos, 6@3-8-6 e 6@6-7-10, utilizando P e $D_{c/cc}$ dos estudos que, de um modo geral, proporcionaram melhores resultados (4-8-6 e 6-7-10).
- Foi possível concluir que a utilização de uma geometria retangular na secção do canal permitia obter melhores resultados quando comparando com os restantes estudos efetuados.
- Avaliando todos os estudos na íntegra foi possível verificar que o principal fator no dimensionamento de um SCT é garantir que existe homogeneidade térmica entre a cavidade e a bucha de uma forma global e localizada, algo que se pode verificar pela análise dos gráficos das Figuras 4.10 e 4.16.

5.2 Trabalhos futuros

O desenvolvimento desta dissertação permitiu complementar e corroborar diversos tópicos já abordados na literatura propondo e revendo regras de projeto de sistemas de controlo de temperatura de ferramentas moldantes diz respeito. Contudo, trata-se apenas de um estudo numérico, que carecendo de validação experimental, pois, existem outros fatores na indústria de moldes que têm de ser tidos em conta relativamente ao projeto e dimensionamento de ferramentas moldantes. Sendo assim, os seguintes tópicos de estudo devem ser explorados:

- Elaboração de um estudo com uma peça técnica e de menor dimensão, de modo a verificar se as conclusões retiradas deste estudo podem ser aplicadas na generalidade no processo de MI.
- Planeamento e elaboração de estudos experimentais comparando as diferentes estratégias utilizadas e realizar uma análise qualitativa e quantitativa de modo a garantir a viabilidade de implementação, em larga escala na indústria, das geometrias que proporcionaram melhores resultados numéricos.
- Elaboração de uma análise estrutural aos insertos dimensionados segundo as regras de Mayer [20] e aos insertos dimensionados de acordo com os pressupostos de Zöllner [61]. Visto tratarem-se de componentes obtidos por processos de MA estes não apresentam as mesmas propriedades caso fossem obtidos por processos subtrativos, pelo que, para uma previsão mais assertiva dos materiais aquando em serviço, modelos do comportamento material deveriam ser desenvolvidos (de preferência de base empírica).

Referências

- [1] P. Martins, *Desenho e Projeto de Moldes*, 1st ed., FCA, Ed. Lisboa: FCA Editora, 2019.
- [2] Cefamol, “História do Sector,” 2017. [Online]. Available: <https://www.cefamol.pt/index.php?id=29>
- [3] V. Almeida, “Otimização do sistema de controlo de temperatura de ferramentas moldantes por recurso de canais conformais,” *thesis*, pp. 1–146, 2019.
- [4] A. B. M. Saifullah and S. H. Masood, “Finite Element Thermal Analysis of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding,” Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia 3122, Tech. Rep., 2007.
- [5] Z. Shayfull, S. Sharif, A. M. Zain, M. F. Ghazali, and R. M. Saad, “Potential of conformal cooling channels in rapid heat cycle molding: A review,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 33, no. 1, mar 2014.
- [6] I. d. M. de Azeméis SA, “Fabricação de moldes de injeção personalizada - IMA.” [Online]. Available: <https://imamagnets.com/pt-pt/moldes-injecao/>
- [7] D. Kazmer, *Injection mold design engineering*. Hanser, 2007.
- [8] B. B. Kanbur, S. Suping, and F. Duan, “Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 7-8, pp. 3253–3271, 2020.
- [9] H.-S. Park and X.-P. Dang, “Design and simulation-based optimization of cooling channels for plastic injection mold,” in *New Technologies - Trends, Innovations and Research*. InTech, mar 2012.
- [10] Z. Wei, J. Wu, N. Shi, and L. Li, “Review of conformal cooling system design and additive manufacturing for injection molds,” pp. 5414–5431, aug 2020.
- [11] H. Zhou and D. Li, “Mold cooling simulation of the pressing process in TV panel production,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 13, no. 3, pp. 273–285, apr 2005.
- [12] S. Feng, A. M. Kamat, and Y. Pei, “Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 171, p. 121082, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082>

- [13] N. S. Rao, G. Schumacher, N. R. Schott, and K. T. O'brien, "Optimization of Cooling Systems in Injection Molds by an Easily Applicable Analytical Model," *Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, vol. 21, no. 5, 2002.
- [14] D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, pp. 1294–1300, may 2005.
- [15] Y. C. engineer) Yang, X. C. engineer) Chen, N. Lu, and F. Gao, *Injection molding process control, monitoring, and optimization*. Carl Hanser Verlag GmbH and Co. KG, 2016.
- [16] T. Bergman L., A. Lavine S., D. Dewitt P., and F. Incropera P., *Heat transfer-incropera*, 7th ed. John Wiley and Sons, Incorporated, 2011.
- [17] K. Kamarudin, M. S. Wahab, M. Ibrahim, M. F. M. Batcha, A. A. Raus, A. Ahmed, N. Sa'ude, Z. Shayfull, and S. M. Nasir, "The Effect of Square Finned Conformal Cooling (SFCC) on Cycle Time for Plastic Injection Moulding," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 79–92, 2017.
- [18] X. Xu', E H "U E L Sachs' and S. Allep, "The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling," Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, Tech. Rep., 2001.
- [19] M. Khan, S. K. Afaq, N. U. Khan, and S. Ahmad, "Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2014, 2014.
- [20] S. Mayer, "Optimised mould temperature control procedure using DMLS," *EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd*, pp. 1–10, 2009.
- [21] G. R. Berger, D. Zorn, W. Friesenbichler, F. Bevc, and C. J. Bodor, "Efficient cooling of hot spots in injection molding. a biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics," *Polymer Engineering and Science*, vol. 59, pp. E180–E188, 3 2019.
- [22] Y.-P. Luh, H.-L. Wang, H.-W. Iao, and T.-C. Kuo, "Using hotspot analysis to establish non-equidistant cooling channels automatically," *CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS*, 2019. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcie20>
- [23] Y. Wang, K. M. Yu, and C. C. Wang, "Spiral and conformal cooling in plastic injection molding," *CAD Computer Aided Design*, vol. 63, pp. 1–11, 2015.
- [24] S. J. Park and T. H. Kwon, "Optimal cooling system design for the injection molding process," *Polymer Engineering and Science*, vol. 38, no. 9, pp. 1450–1462, 1998.
- [25] G. Venkatesh and Y. Ravi Kumar, "Thermal Analysis for Conformal Cooling Channel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 2592–2598, 2017.

- [26] M. S. Wahab, A. A. A. Raus, I. Amir, A. Ahmed, and K. Kamarudin, “The thermal effect of variate cross-sectional profile on conformal cooling channels in plastic injection moulding,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 156–163, 2018.
- [27] S. A. Jahan and H. El-Mounayri, “Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding,” *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 888–900, 2016. [Online]. Available: <http://www.sme.org/namrc>
- [28] K. Altaf, A. Majdi, and A. Rani, “Numerical study of profiled conformal cooling channels for cooling time reduction in injection mould tools,” Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, 31750 Tronoh, Perak, Malaysia, Tech. Rep. 4, 2015.
- [29] K. M. Au and K. M. Yu, “A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 5-6, pp. 496–515, 2007.
- [30] M. Cortina, J. Iñaki Arrizubieta, A. Calleja, E. Ukar, and A. Alberdi, “Case Study to Illustrate the Potential of Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Dies Manufactured Using Hybrid Process of Laser Metal Deposition (LMD) and Milling,” *Metals*, feb 2018. [Online]. Available: www.mdpi.com/journal/metals
- [31] M. G. Ozden and N. A. Morley, “magnetochemistry Laser Additive Manufacturing of Fe-Based Magnetic Amorphous Alloys,” *Magnetochemistry*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7020020>
- [32] S. Z. A. Rahim, S. Sharif, A. M. Zain, S. M. Nasir, and R. Mohd Saad, “Improving the Quality and Productivity of Molded Parts with a New Design of Conformal Cooling Channels for the Injection Molding Process,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 35, no. 1, mar 2016.
- [33] M. Hearunyakij, S. Sontikaew, and D. Sriprapai, “Improvement in the cooling performance of conformal mold cooling by using fin concept,” *International Journal of Mining, Metall*, vol. 2, no. 2, pp. 41–46, 2014.
- [34] K. Kamarudin, M. S. Wahab, M. F. Batcha, Z. Shayfull, A. A. Raus, and A. Ahmed, “Cycle time improvement for plastic injection moulding process by sub groove modification in conformal cooling channel,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1885. American Institute of Physics Inc., sep 2017.
- [35] P. Freitas, C. Santos, P. Carreira, and A. Mateus, “High Efficiency Cooling and Heating Channels for Injection Moulding,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 890, pp. 43–53, apr 2019.
- [36] A. Agazzi, V. Sobotka, R. Legoff, and Y. Jarny, “Inverse method for the cooling system design in injection moulding-application to a ’T-shaped’ piece,” *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2013. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=gipe21>

- [37] Y. Wang, K. M. Yu, C. C. Wang, and Y. Zhang, “Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling,” *CAD Computer Aided Design*, vol. 43, no. 8, pp. 1001–1010, 2011.
- [38] J. M. Mercado-Colmenero, C. Martin-Doñate, M. Rodriguez-Santiago, F. Moral-Pulido, and M. A. Rubio-Paramio, “A new conformal cooling lattice design procedure for injection molding applications based on expert algorithms,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03235-3>
- [39] Z. Li, X. Wang, J. Gu, S. Ruan, C. Shen, Y. Lyu, and Y. Zhao, “Topology Optimization for the Design of Conformal Cooling System in Thin-wall Injection Molding Based on BEM,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, no. 1-4, pp. 1041–1059, jan 2018.
- [40] S. Bastien Valette, J.-M. Chassery, and R. M. Prost, “Generic Remeshing of 3D Triangular Meshes with Metric-Dependent Discrete Voronoi Diagrams,” *IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHIC*, 2008.
- [41] S. Q. Xin and G. J. Wang, “Efficiently determining a locally exact shortest path on polyhedral surfaces,” *CAD Computer Aided Design*, vol. 39, no. 12, pp. 1081–1090, dec 2007.
- [42] J.-Y. Chen, M.-S. Huang, S.-H. Oh, J.-W. Ha, and K. Park, “Adaptive Conformal Cooling of Injection Molds Using Additively Manufactured TPMS Structures,” *Polymers*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14010181>
- [43] D. J. Yoo, “Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surface models,” *Biomaterials*, vol. 32, no. 31, pp. 7741–7754, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.07.019>
- [44] O. Al-Ketan, R. K. Abu Al-Rub, U. Abu Dhabi, and A. Dhabi, “MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces,” *John Wiley and Sons, Ltd*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/mdp2.205>
- [45] J. Kim and D.-J. Yoo, “3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 2020, no. 4, pp. 527–550, 2020. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/jcde/article/7/4/527/5817530>
- [46] C. Relvas, L. M. Mota, J. A. Simões, and A. M. Ramos, *Engenharia+Design*, 1st ed., Publindústria, Ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2017.
- [47] J. P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs, and J. Van Humbeeck, “Part and material properties in selective laser melting of metals,” *16th International Symposium on Electromachining, ISEM 2010*, no. January 2015, pp. 3–14, 2010.
- [48] European Union, “Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011,” *Official Journal of the European Union*, pp. 1–89, 2011. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:012:0001:0089:EN:PDF>

- [49] “Plastic Materials | Free Online Database for Plastic Industry,” 2022. [Online]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/>
- [50] P. Industry, *Plastics engineering handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc.* Van Nostrand Reinhold, 1992, vol. 29, no. 08.
- [51] ISO 20457:2018(en), Plastics moulded parts — Tolerances and acceptance conditions. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20457:ed-1:v1:en>
- [52] I. Proto Labs, “Planning for Parting Lines in Injection Molding,” 2022. [Online]. Available: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/planning-for-parting-lines-in-injection-molding/>
- [53] SIMTEC Silicone Parts, “Injection Molds: Hot Runner vs. Cold Runner,” p. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.simtec-silicone.com/blogs/injection-molds-hot-runner-vs-cold-runner-molds/>
- [54] G. Menges, W. Michaeli, and P. Mohren, *How to make Injection Molds*, 3rd ed. Munich: Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati, 2001.
- [55] D. Frenkler and H. Zawistowski, *Hot Runners in Injection Moulds*, 1st ed. Shawbury: Rapra Technology LTD., 2001.
- [56] © 2021 HASCO, “Hasco- Hot Runner,” p. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.hasco.com/pt/hotrunner/home>
- [57] F. Dias, J. da Cruz, R. Valente, and R. Sousa, *Método dos Elementos Finitos*, 2nd ed., lda. Lidel-Edições Técnicas, Ed. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2007.
- [58] “Moldflow Insight Help | Mesh statistics | Autodesk.” [Online]. Available: https://help.autodesk.com/view/MFIA/2021/ENU/?guid=MoldflowInsight_CLC_Modelprep_Mesh_Mesh_statistics_html
- [59] P. Castro, “Produto robusto, desenho de experiências, matriz intrínseca, matriz extrínseca, sinal-para-ruído (SN), factor-de-controlo , factor-de-sinal, parâmetro, tolerâncias.” *Design*, 2009.
- [60] R. da Cunha Norte Mendes, “Materiais de mudança de fase para aquecimento em escoamentos laminares,” Ph.D. dissertation, Aveiro, 2013.
- [61] O. Zollner, “Optimised mould temperature control,” *Application Technology Information*, pp. 1104–1109, 1997.
- [62] “Beryllium - Element information, properties and uses | Periodic Table.” [Online]. Available: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/4/beryllium>

Anexos

Anexo A

Ficha técnica material

SABIC® HDPE CC3054

HIGH DENSITY POLYETHYLENE

DESCRIPTION

SABIC® HDPE CC3054 is a high density polyethylene copolymer injection molding grade. Its narrow molecular weight distribution and high flow results in low warpage, good rigidity, good gloss and fast molding cycles. SABIC® HDPE CC3054 is typically used for caps and closures applications and thin wall articles.

This product is not intended for and must not be used in any pharmaceutical/medical applications.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20211203

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
POLYMER PROPERTIES			
Melt Flow Rate (MFR)			
at 190 °C and 2.16 kg	30	dg/min	ISO 1133
Density ⁽¹⁾	954	kg/m ³	ISO 1183
MECHANICAL PROPERTIES ^{(1) (2)}			
Tensile test ^{(3) (4)}			
stress at yield	26	MPa	ISO 527-2
stress at break	25	MPa	ISO 527-2
strain at break	200	%	ISO 527-2
tensile modulus	1100	MPa	ISO 527-2
Flexural test			
Flexural modulus	1250	MPa	ISO 178
Flexural strength	27	MPa	ISO 178
Izod impact notched			
at 23 °C	3	kJ/m ²	ISO 180/A
Hardness Shore D	61	-	ISO 868
ESCR on Caps ⁽⁵⁾	10	h	SABIC method
THERMAL PROPERTIES			
Heat deflection temperature ^{(1) (2)}			
at 0.45 MPa (HDT/B)	82	°C	ISO 75-2
Vicat Softening Temperature ^{(1) (2)}			
at 10 N (VST/A)	125	°C	ISO 306
DSC test			
melting point	132	°C	ISO 11357-3
enthalpy change	205	J/g	ISO 11357-3

(1) Compression moulding of test specimen according to ISO 1872-2

(2) Conditioning of test specimen: temp. 23 °C, relative humidity 50 %, 24 hours

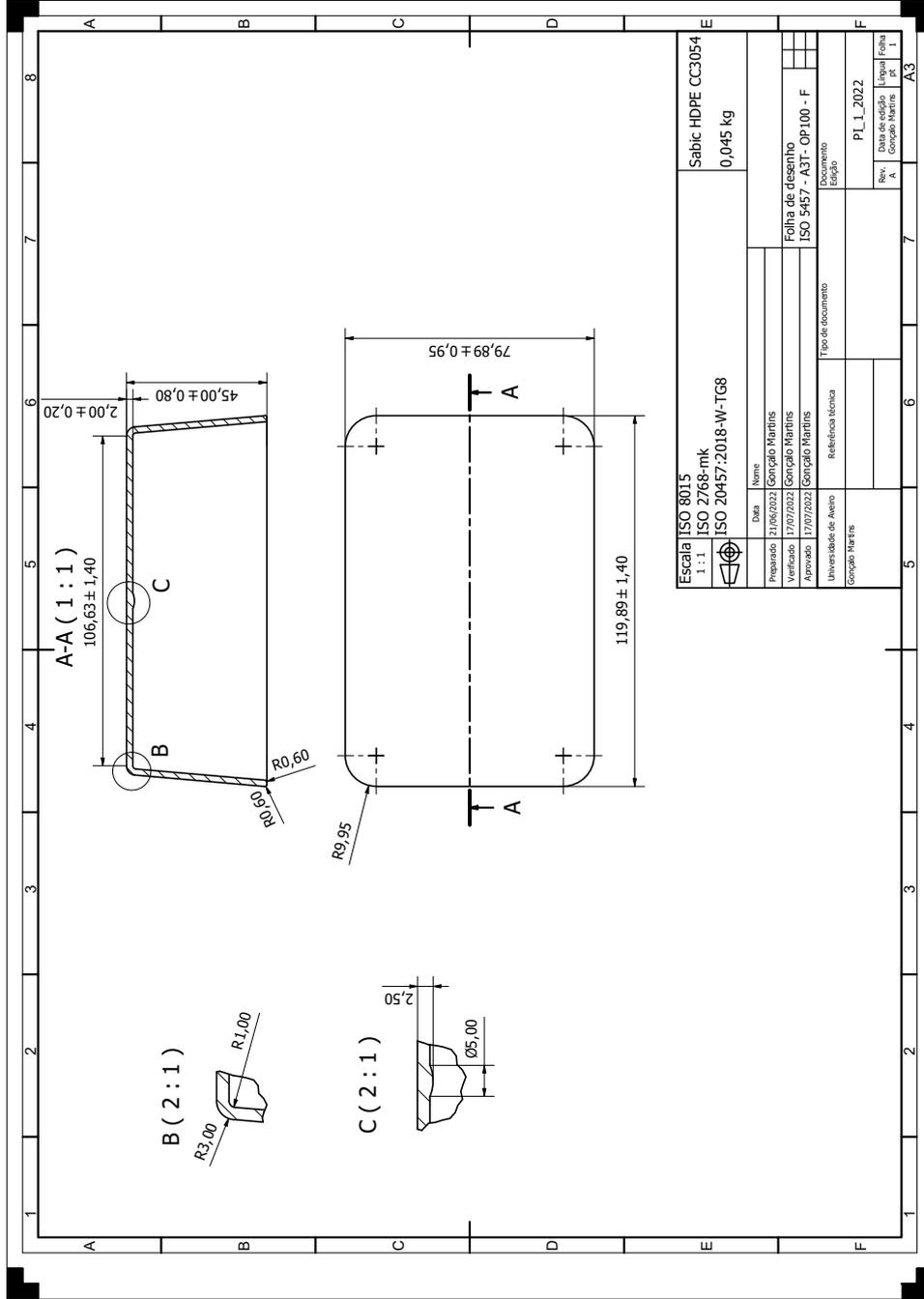
(3) Speed of testing: 50 mm/min

(4) Test specimen according to ISO 527-2 type 1BA, thickness 2 mm

(5) Determined in 10% Igepal CO-630 at 40 °C, 6 bar internal water pressure, thickness 1 mm

Anexo B

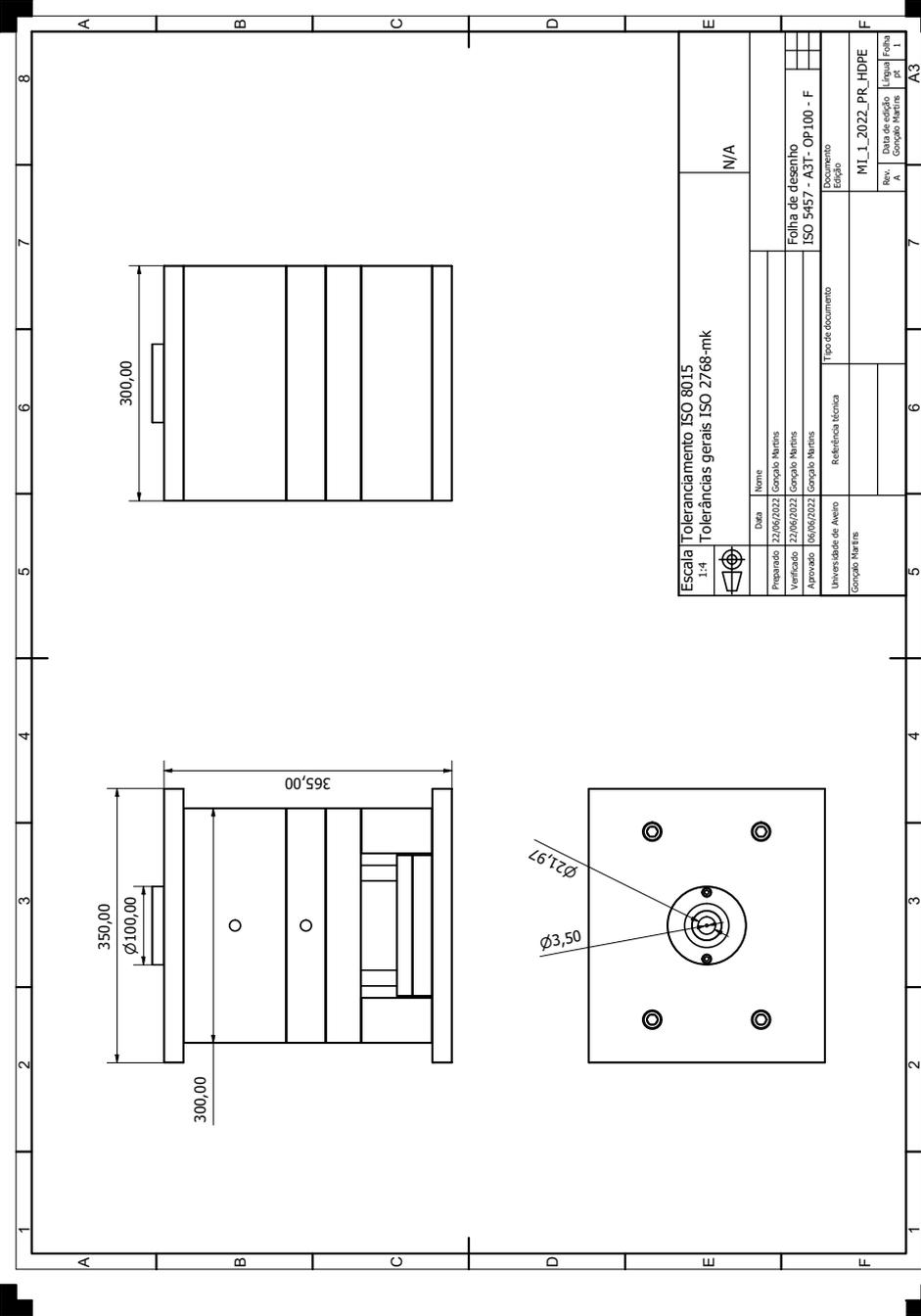
Desenho técnico da peça



Escala		ISO 8015	Sabic HDPE CC3054	
1:1		ISO 2768-mk	0,045 kg	
ISO 20457:2018-W-TG8				
Data	Nome			
21/06/2022	Gonçalo Martins			
17/07/2022	Gonçalo Martins	Folha de desenho		
17/07/2022	Gonçalo Martins	ISO 5457 - A3T - OP100 - F		
Universidade de Aveiro	Referência técnica	Documento		
Gonçalo Martins	Edição	Edição		
Tipo de documento		PL_1_2022		
Data de edição		Data de edição		
Rev. A		Rev. A		
Lugual		Lugual		
pt		pt		
1		1		
A3		A3		

Anexo C

Desenho técnico do molde



Escala		Toleranciamento ISO 8015		Tolerâncias gerais ISO 2768-mk		N/A	
		Nome Gonçalo Martins		Data 22/06/2022		Folha de desenho ISO 5457 - A3T - OP100 - F	
Preparado Gonçalo Martins		Verificado Gonçalo Martins		Aprovado Gonçalo Martins		Documento ML_1_2022_PR_HDPE	
Universidade de Aveiro Gonçalo Martins		Referência técnica Edição		Tipo de documento		Rev. A Data de edição 22/06/2022	
1		5		6		7	
A		B		C		A3	

Anexo D

Ficha técnica da máquina de injeção

TECHNICAL DATA | 420 C GOLDEN EDITION

Clamping unit		420 C GOLDEN EDITION	
with clamping force	max. kN	1000	
Opening force stroke	max. kN mm	250 500	
Mould height, fixed variable	min. mm	250 ---	
Platen daylight fixed variable	max. mm	750 ---	
Distance between tie bars (w x h)	mm	420 x 420	
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	570 x 570	
Weight of movable mould half	max. kg	600	
Ejector force stroke	max. kN mm	40 175	
Dry cycle time EUROMAP 2	min. s - mm	1,8 - 294	

Injection unit		290		
with screw diameter	mm	30	35	40
Effective screw length	L/D	23,3	20	17,5
Screw stroke	max. mm	150		
Calculated stroke volume	max. cm ³	106	144	188
Shot weight	max. g PS	97	132	172
Material throughput	max. kg/h PS	17	20,5	24,5
	max. kg/h PA6.6	8,5	10,5	12,5
Injection pressure	max. bar	2500	2000	1530
Holding pressure	max. bar	2500	2000	1530
Injection flow 2	max. cm ³ /s	102	140	182
Screw circumferential speed 2	max. m/min	46	54	62
Screw torque	max. Nm	320	380	430
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	60 240		
Heating capacity zones	kW	6,4 5		
Feed hopper	l	50		

Drive and connection		2 pumps		
with injection unit		290		
Net weight of machine	kg	3650		
Sound press. level Insecurity 4	dB(A)	68 3		
Oil filling	l	235		
Drive power 2	max. kW	15		
Electrical connection 3	kW	24		
	Total	80		
	Machine	---		
	Heating	---		
Cooling water connection	max. °C	30		
	min. Δp bar	1,5 DN 25		

Machine type
with EUROMAP size designation 1
420 C GOLDEN EDITION 1000-290

All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

- 1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (kbar)
 - 2) Specifications depend on the drive variant / drive configuration.
 - 3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
 - 4) Detailed info in the operating instr.
- [] Specifications apply to alternative equipment.

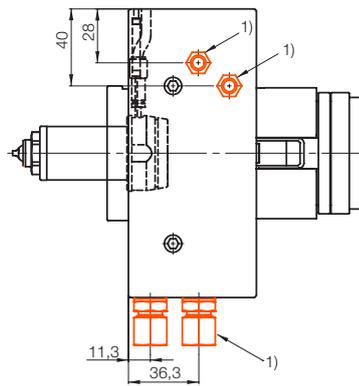
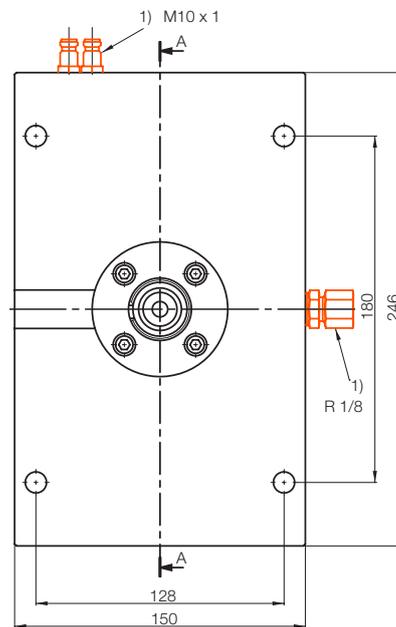
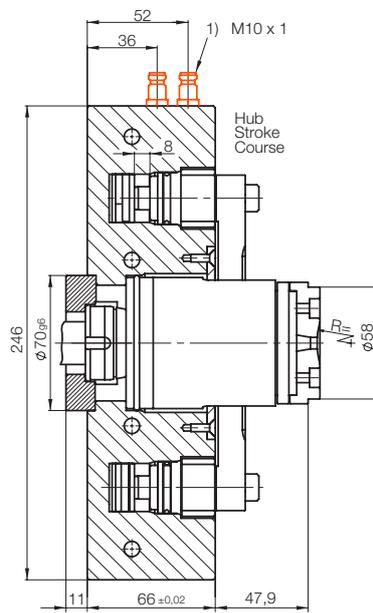
Anexo E

Unidade valvulada

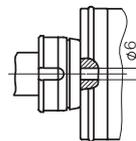
H2020/6/.../S

Einzelnadelventil / hydraulisch
 Single needle valve / hydraulic
 Obturateur singulaire / hydraulique

750 W



1) Nicht im Lieferumfang enthalten
 Not included with the package
 Ne sont pas comprises dans la livraison



Schmelzkanal Melt channel Canal de matière fondue	Antrieb Drive Entraînement	Nr./No.
Ø6	hydraulisch hydraulic hydraulique	H2020/6/ 150x246x66/S

Anexo F

Ficha técnica do bico de injeção

Offene Spitze/Open tip/Pointe ouverte

H33401/...- H334053/...

Techni Shot
 Heißkanaldüse
 Hot runner nozzle
 Buse à canal chaud

← * = Fe-CuNi, Type J



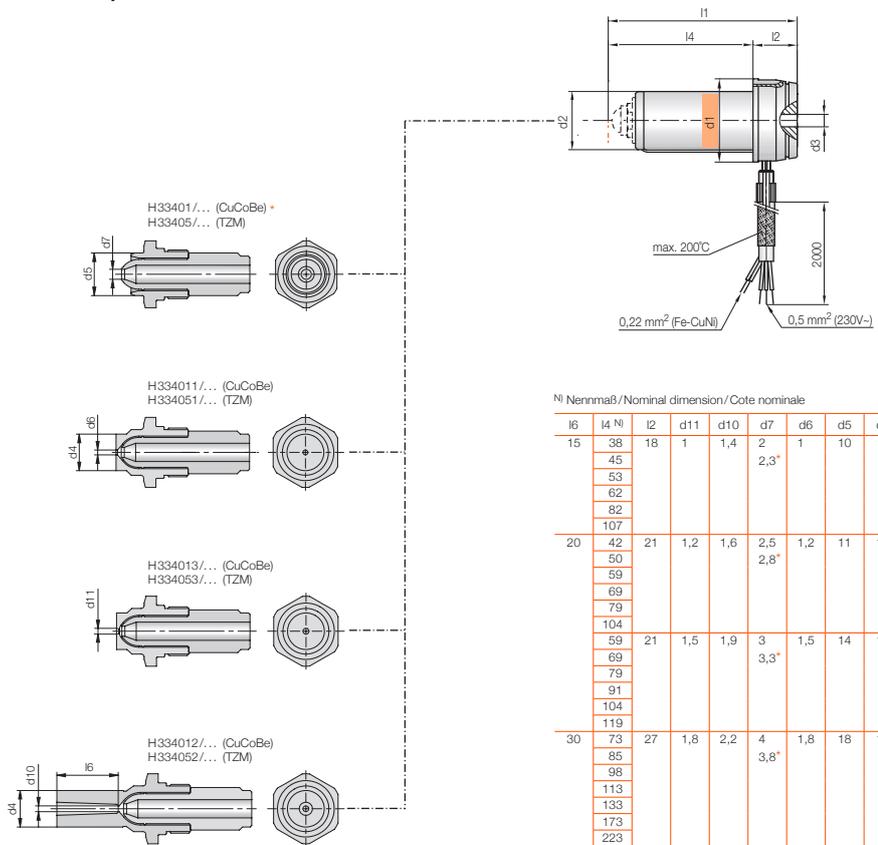
Bestell-Beispiel
 Ordering example
 Exemple de commande

H33401 / 25 x 63

1. Prod. Nr. (siehe Spitzenausführung)
 Product no. (see tip design)
 Code produit (ref. design de pointe)

2. Größe/Size/Taille (d1)

3. Länge/Length/Longueur (l1)



N) Nennmaß/Nominal dimension/Cote nominale

l6	l4 N)	l2	d11	d10	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1	l1 N)	Nr./No.
15	38	18	1	1,4	2	1	10	8	4,5	18	25	56	.../25x 56
	45				2,3*							63	63
	53											71	71
	62											80	80
	82											100	100
	107											125	125
20	42	21	1,2	1,6	2,5	1,2	11	10	5,5	22	32	63	.../32x 63
	50				2,8*							71	71
	59											80	80
	69											90	90
	79											100	100
	104											125	125
20	59	21	1,5	1,9	3	1,5	14	12	6	28	40	80	.../40x 80
	69				3,3*							90	90
	79											100	100
	91											112	112
	104											125	125
	119											140	140
30	73	27	1,8	2,2	4	1,8	18	14	8	35	50	100	.../50x100
	85				3,8*							112	112
	98											125	125
	113											140	140
	133											160	160
	173											200	200
35	223											250	250
	95	30	3,5	4	6,1	3,5	25	20	13	44	60	125	.../60x125
	110											140	140
	130											160	160
	170											200	200
	220											250	250
270											300	300	

Anexo G

Ficha técnica do Aço AISI P20

P20 (T51620)

Product Datasheet



Tool Steel

Service. Quality. Value.

Mould Steel

P20 a versatile steel commonly used in the production of large mould frames & bolsters.

Characterised by good toughness at moderate strength levels, P20 tool steel is a highly versatile engineering material. The alloy is a pre-hardened plastic mould steel and provides unified hardness across wide sections. Typical applications for the alloy include tooling, die casting dies for zinc and machine cut plastic moulds. The inclusion of nickel and chromium during the alloying process enhances the hardness and toughness of the product. The product benefits from good weldability and offers an excellent polished finish. To achieve maximum surface hardness required in applications such as compression moulding plastic dies, case hardening or nitriding is an option.



Key Features

- Pre-hardened
- Good machinability
- Good weldability
- Good hardness
- Excellent polished finish

Applications

- Bolsters
- Injection moulds
- Deep set mould tools
- Die holders
- Casting dies

Chemical Composition (weight %)

	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	P	S			
Min	0.28	0.6	0.2	1.4	0.3						
Max	0.4	1.0	0.8	2.0	0.55	0.25	0.03	0.03			

Mechanical Properties (typical)

Hardness Brinell	Hardness Rockwell	Tensile Strength Ultimate	Tensile Strength Yield	Elongation at break (in 50mm (2"))	Elastic Modulus
300	30	965 - 1030 MPa	827 - 862 MPa	20%	190 - 210 GPa

Tempering

Heat uniformly and soak at the tempering temperature for at least one hour per 25mm of section. Allow to cool in still air.

Temperature (°C)	100	200	300	400	500	600
Hardness (HRC)	51	50	48	46	42	36
Tensile (N/mm ²)	1730	1670	1570	1480	1330	1140

We stock P20 mould tool steel in round bar, flat bar and plate forms.

UK Service Centres:

Smiths Belfast	02895 908 897	Smiths Leeds	0113 307 5167
Smiths Biggleswade	01767 604 704	Smiths London	020 7241 2430
Smiths Birmingham	0121 728 4940	Smiths Manchester	0161 794 8650
Smiths Bristol	0117 971 2800	Smiths Norwich	01603 789 878
Smiths Chelmsford	01245 466 664	Smiths Nottingham	0115 925 4801
Smiths Gateshead	0191 469 5428	Smiths Redruth	01209 315 512
Smiths Horsham	01403 261 981	Smiths Verwood	01202 824 347

Quality & Testing:



0845 527 3331

www.smithmetal.com

info@smithmetal.com

All information in our data sheet is based on approximate testing and is stated to the best of our knowledge and belief. It is presented apart from contractual obligations and does not constitute any guarantee of properties or of processing or application possibilities in individual cases. Our warranties and liabilities are stated exclusively in our terms of trading.

© Smiths Metal Centres 2022

Anexo H

Ficha técnica do AMPCOLOY 940



Technical Data Sheet
AMPCOLOY® 940
Extrusions

Nominal composition:

Nickel	(Ni)	2.5%
Silicium	(Si)	0.7%
Chromium	(Cr)	0.4%
Copper	(Cu)	balance

Nearest international specifications:

D	DIN	
F	AFNOR	
GB	BS	
USA	RWMA	Class 3

Mechanical and physical properties	Units	≤ 25 mm	25 - 50 mm	> 50 mm
Tensile strength Rm	MPa	689	669	662
Yield strength Rp 0.5	MPa	517	517	510
Elongation A5	%	13	13	13
Brinell hardness	HBW 10/3000	210	210	210
Rockwell hardness	HRB	95	95	95
Reduction of area ψ	%	20	20	20
Compressive strength, 0.1 % perm. set	MPa	552	552	552
Modulus of elasticity	GPa	131	131	131
Density ρ	g / cm ³	8.71		
Coefficient of expansion α	10 ⁻⁶ / K	17.5		
Thermal conductivity λ	W / m · K	208		
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm ²	28		
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	48		
Specific heat Cp	J / g · K	0.38		

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL.

AMPCOLOY® 940 is a patented alloy which meets the demands of users of the RWMA class 3 alloys without Beryllium. In the industrialized countries, stricter health and safety instructions on the use of noxious elements have forced AMPCO METAL to develop this new alloy. It replaces the AMPCOLOY® 95 in practically all applications.

APPLICATIONS:

AMPCOLOY® 940 is used wherever a good electrical or thermal conductivity is required together with high mechanical properties:

Electrode holders and seam welding shafts

Spot welding electrodes, seam welding discs, projection and butt welding dies, principally for stainless steel and Monel

Plunger tips for cold chamber aluminium die casting machines

Parts of moulds for injection moulding of plastics, injection-nozzles and cooling pins

Brake drums for paper winding rolls.

Parts for energy engineering

Anexo I

Ficha técnica do Aço Maraging 18Ni300

General information

Designation

High alloy steel, 280 (300) Maraging Steel, Maraged at 482°C (900°F)	
Condition	Maraged at 480°C
UNS number	K93120, ~J93150 (cast)
US name	AMS 6521
EN number	1.6354, 1.6358

Typical uses

Missile cases, aircraft forgings, structural parts, cannon recoil springs, Belleville springs, bearings, transmission shafts, fan shafts in commercial jet engines, couplings, hydraulic hoses, bolts, punches, and dies.

Included in Materials Data for Simulation	✓
---	---

Composition overview

Compositional summary

Fe65-68 / Ni18-19 / Co8.5-9.5 / Mo4.6-5.2 / Ti0.5-0.8 / Al0.05-0.15 (impurities: Mn<0.1, Si<0.1, C<0.03, P<0.01, S<0.01)

Material family	Metal (ferrous)
Base material	Fe (Iron)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	0.05	-	0.15	%
C (carbon)	0	-	0.03	%
Co (cobalt)	8.5	-	9.5	%
Fe (iron)	* 65.1	-	68.4	%
Mn (manganese)	0	-	0.1	%
Mo (molybdenum)	4.6	-	5.2	%
Ni (nickel)	18	-	19	%
P (phosphorus)	0	-	0.01	%
S (sulfur)	0	-	0.01	%
Si (silicon)	0	-	0.1	%
Ti (titanium)	0.5	-	0.8	%

Price

Price	* 31.8	-	37.5	EUR/kg
Price per unit volume	* 2.51e5	-	2.98e5	EUR/m ³

Physical properties

Density	7.88e3	-	7.96e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

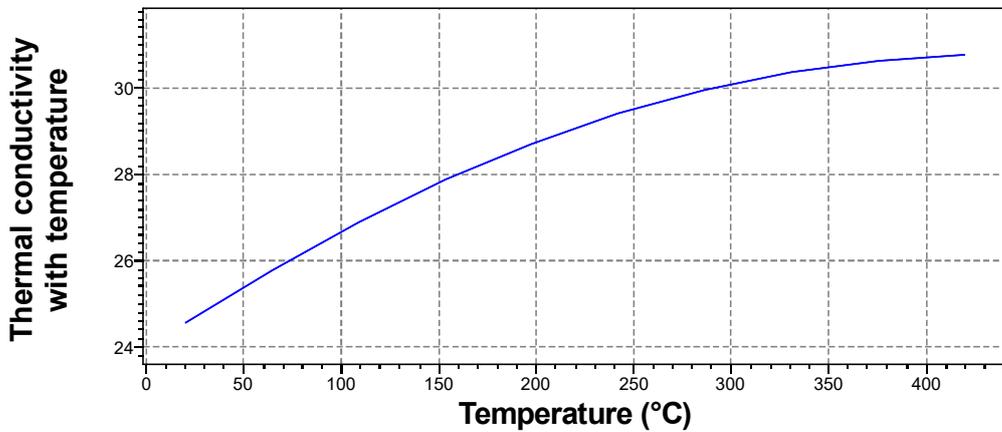
Young's modulus	183	-	192	GPa
Young's modulus with temperature	190	-	190	GPa

Fracture toughness	75	-	85	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	30	-	38.4	kJ/m ²

Thermal properties

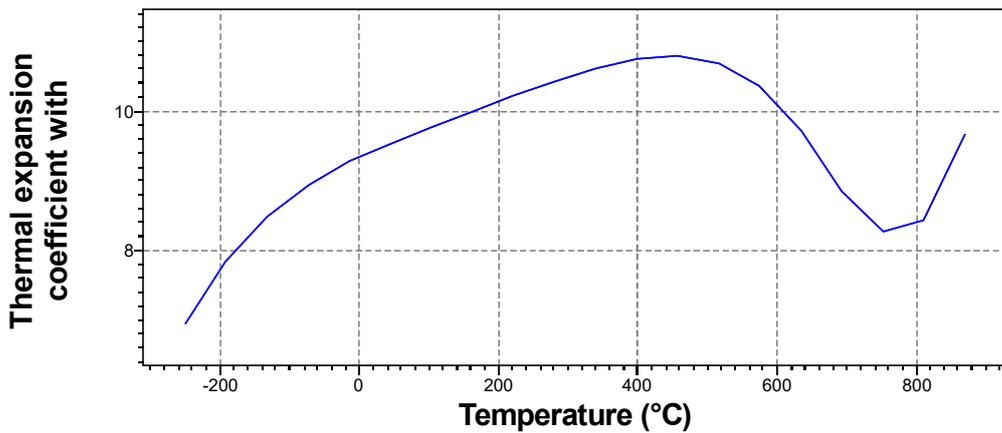
Melting point	1.43e3	-	1.45e3	°C
Maximum service temperature	460	-	490	°C
Minimum service temperature	* -73	-	-53	°C
Thermal conductivity	25.1	-	27.2	W/m.°C
Thermal conductivity with temperature	24.6	-	24.6	W/m.°C

[Parameters](#) Temperature = 23°C



Specific heat capacity	377	-	392	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	9.9	-	10.4	µstrain/°C
Thermal expansion coefficient with temperature	9.44	-	9.44	µstrain/°C

[Parameters](#) Temperature = 23°C



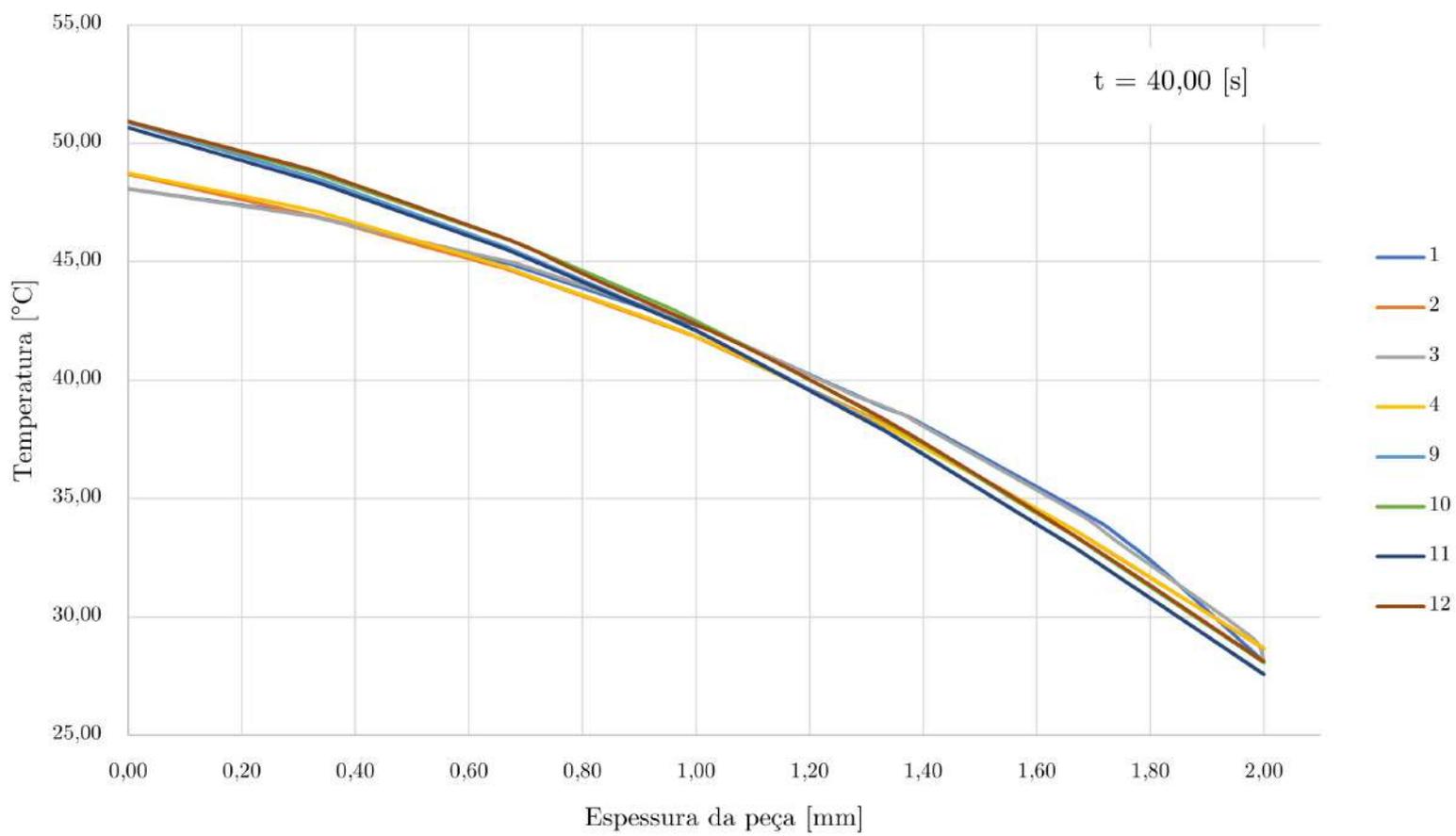
Reference temp 20 °C

Values marked * are estimates.
ANSYS Granta provides no warranty for this data.

Anexo J

Gráfico da temperatura ao longo da espessura da peça no estudo de arquitetura convencional

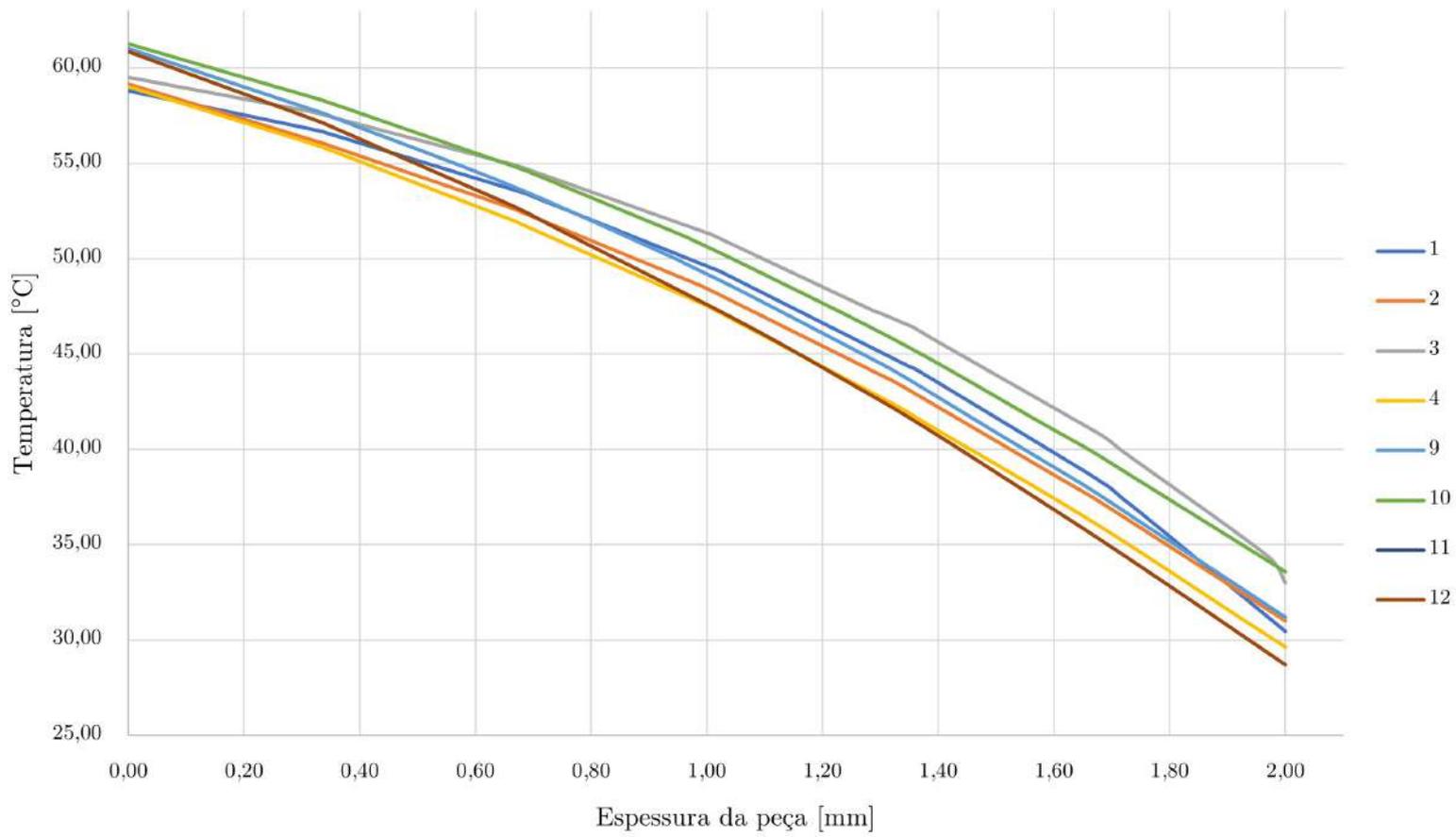
Temperatura ao longo da espessura da peça, canal convencional 8-16-16



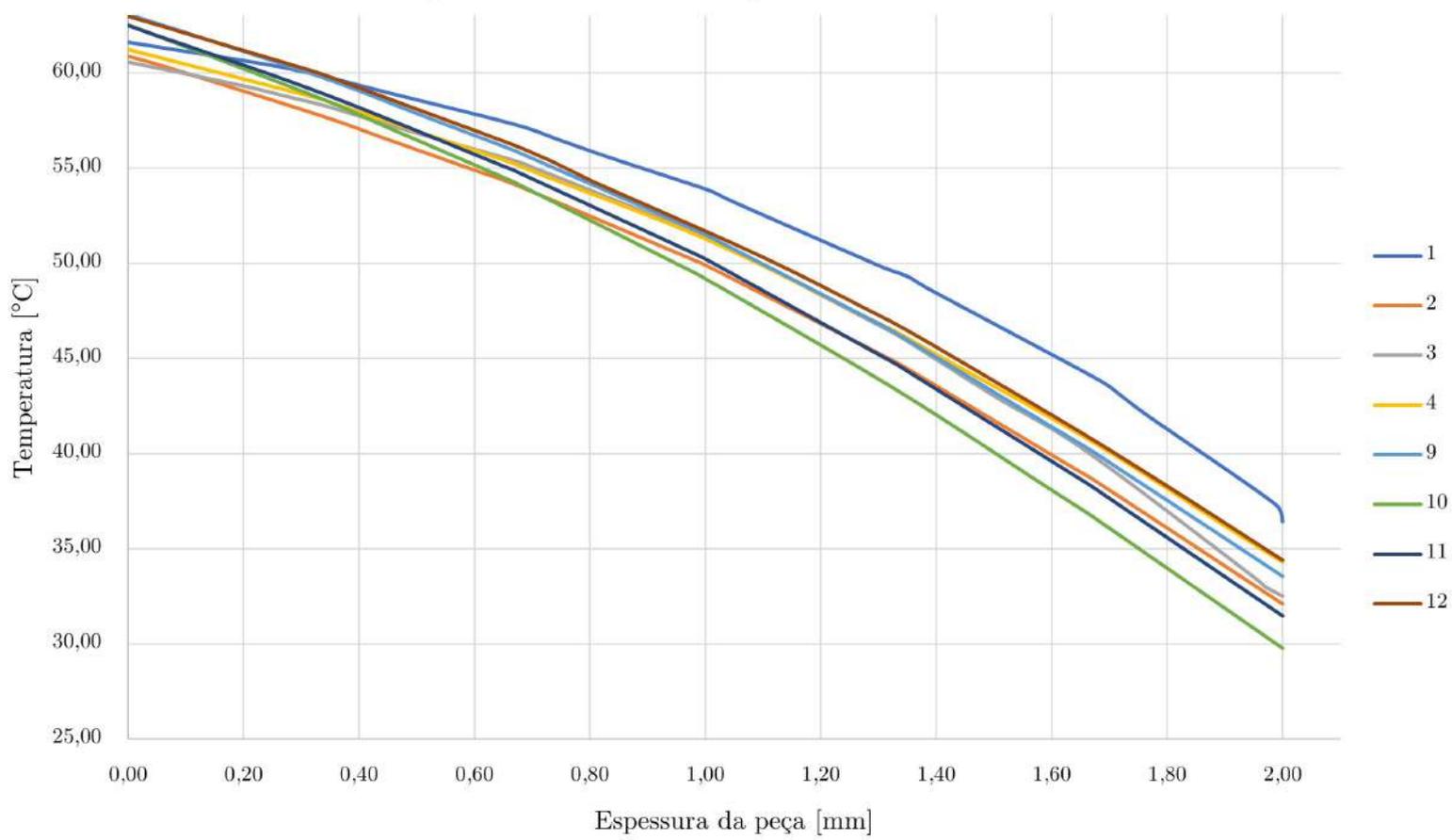
Anexo K

Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com as regras de projeto de Mayer

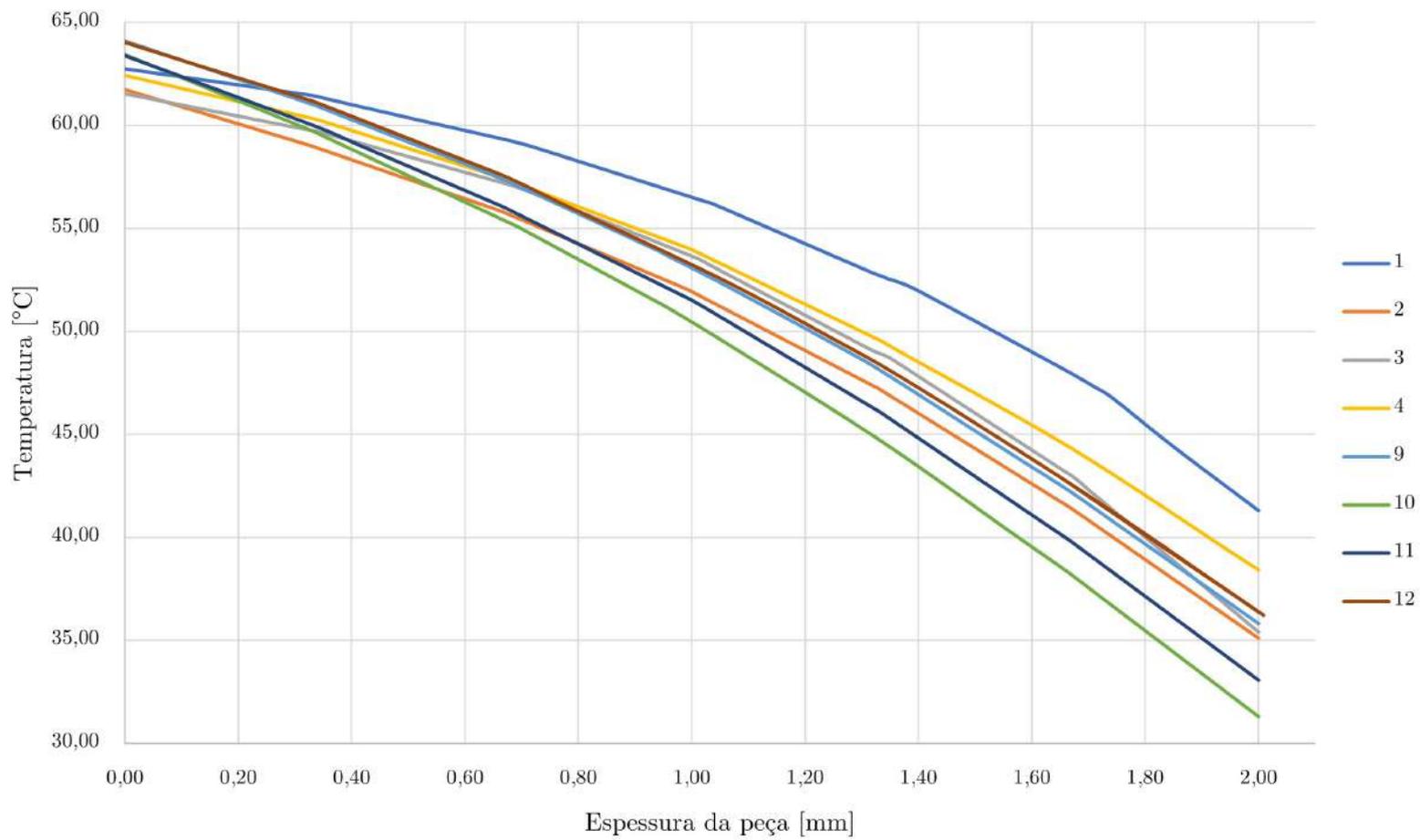
Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 4-8-6



Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 6-12-9



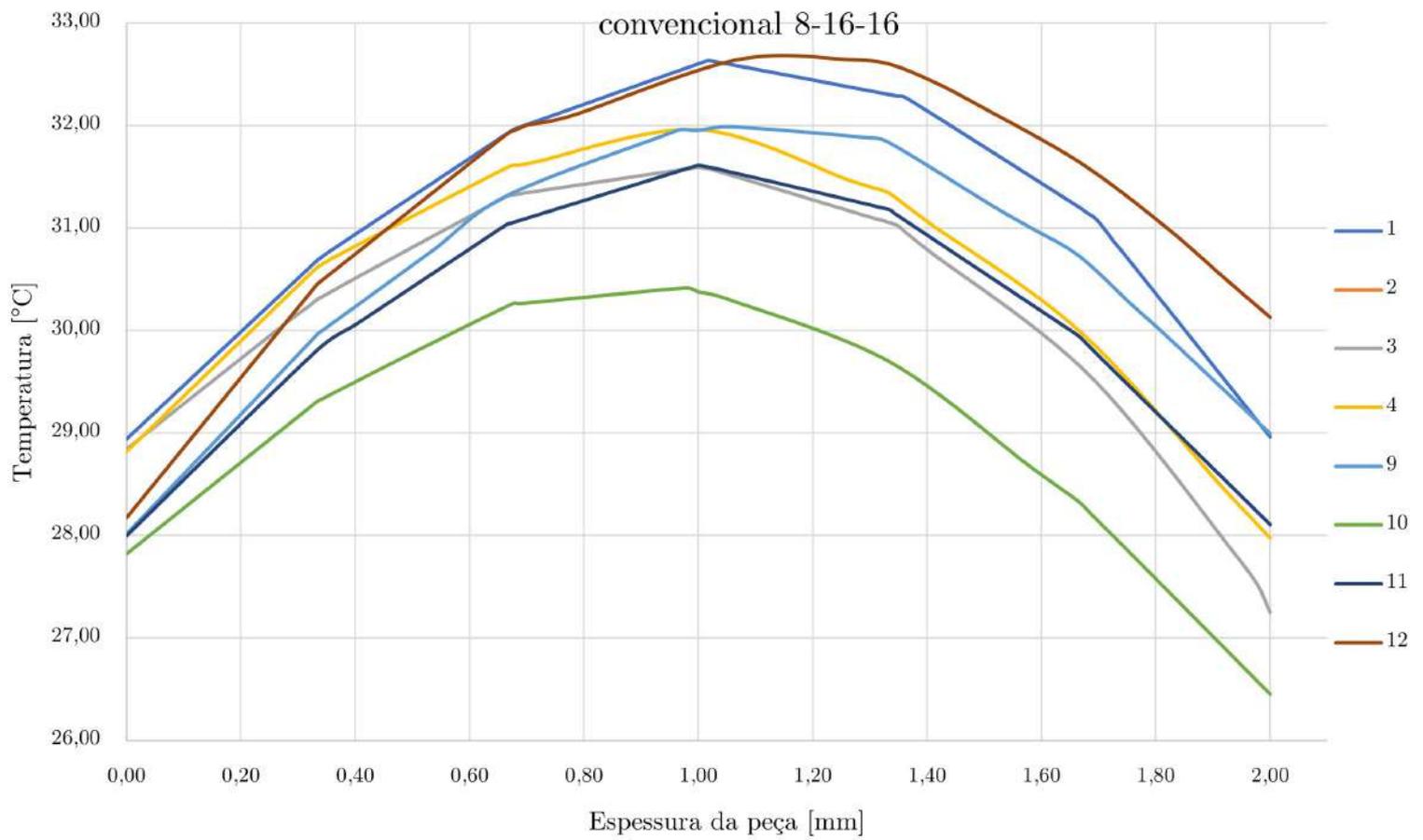
Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 8-16-12



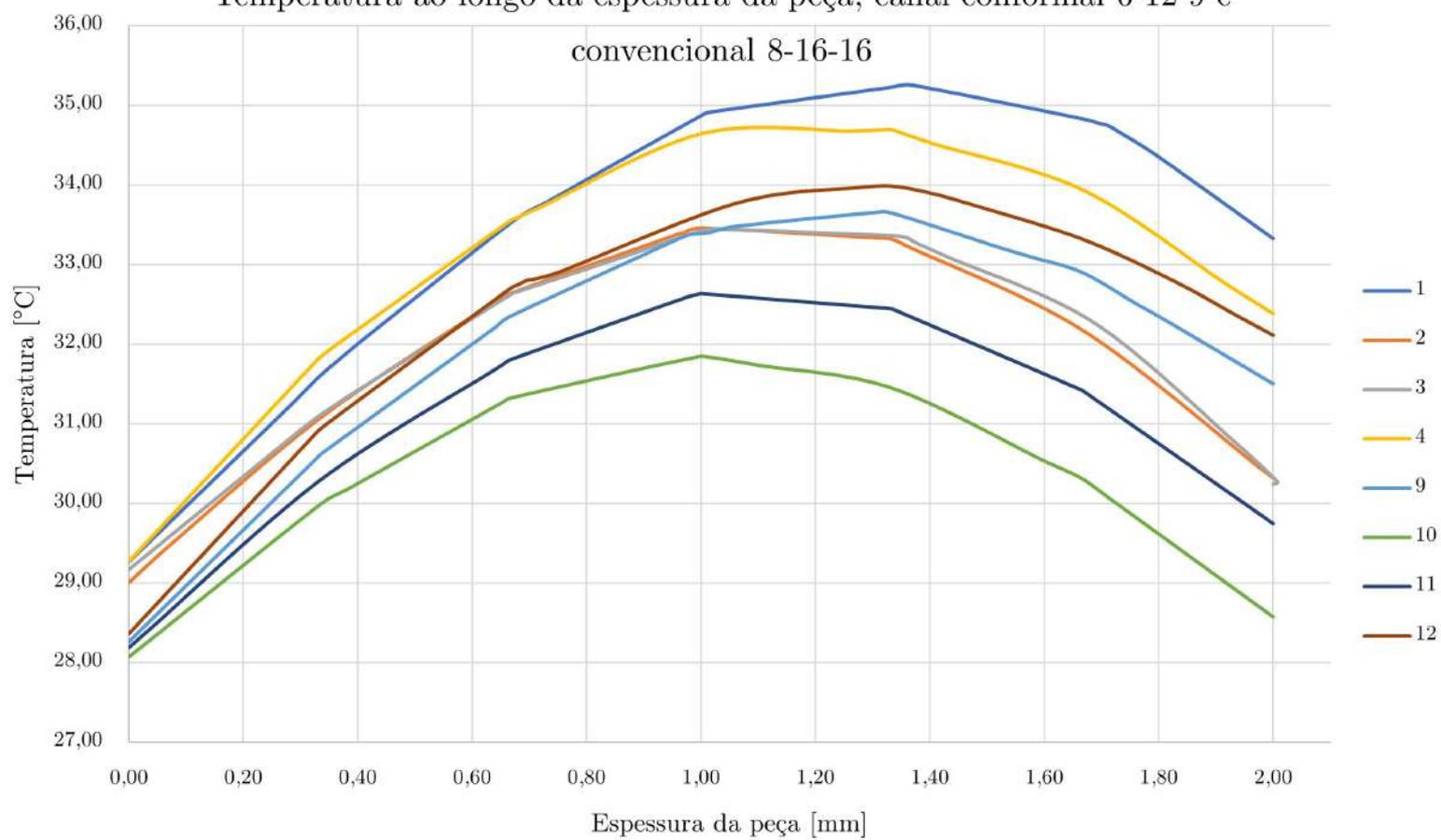
Anexo L

Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com as regras de projeto de Mayer com canal na cavidade

Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 4-8-6 e convencional 8-16-16



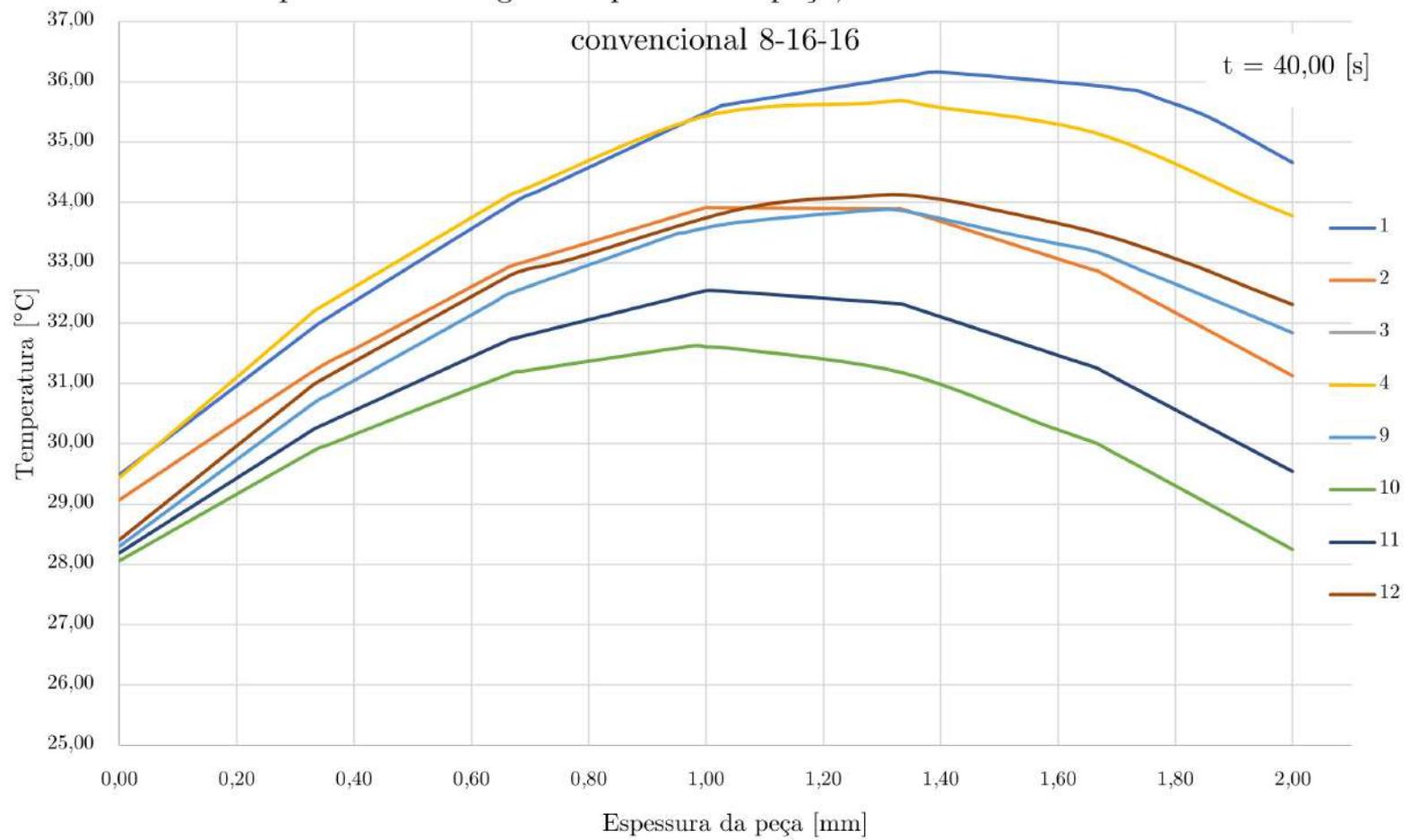
Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 6-12-9 e convencional 8-16-16



Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 8-16-12 e

convencional 8-16-16

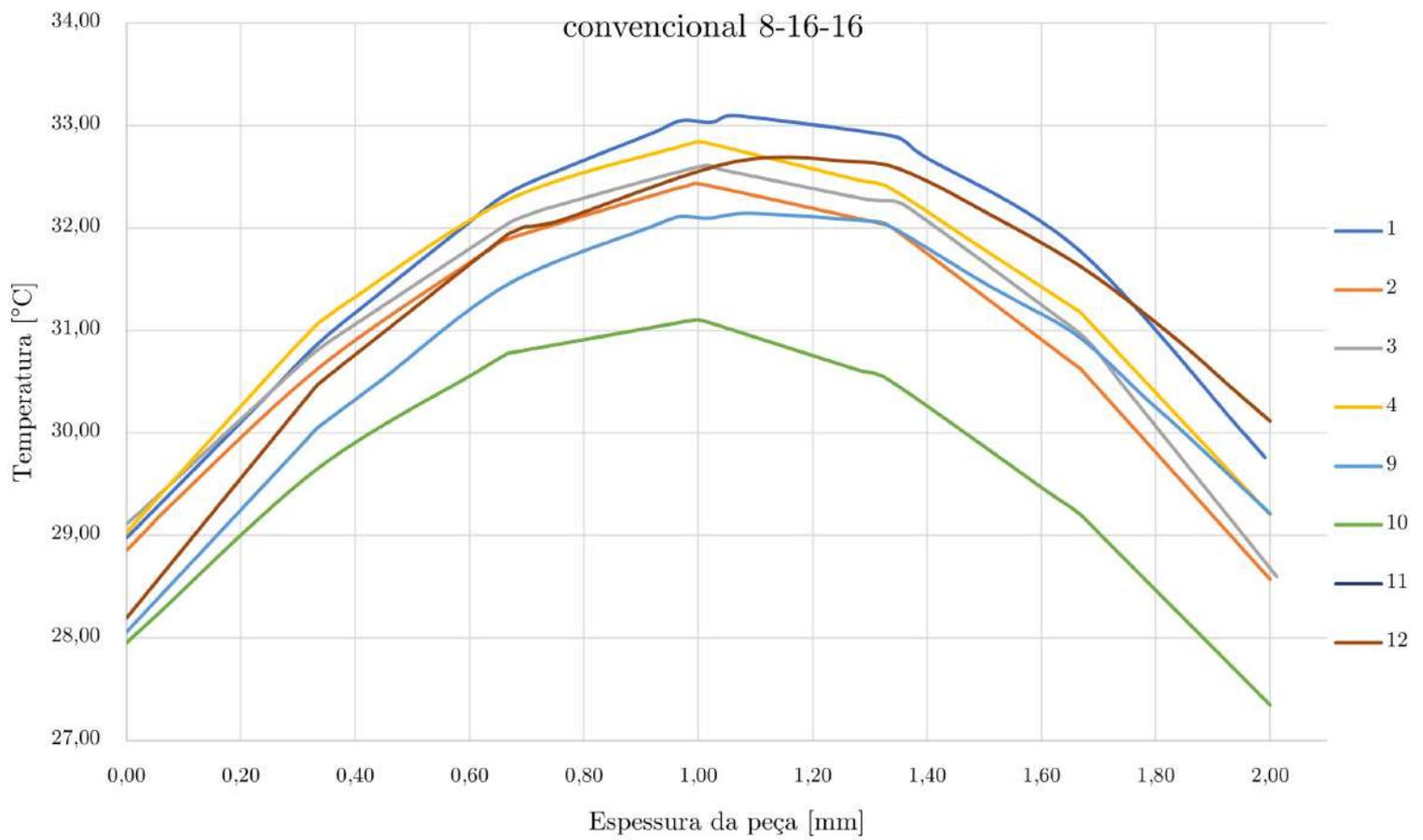
t = 40,00 [s]



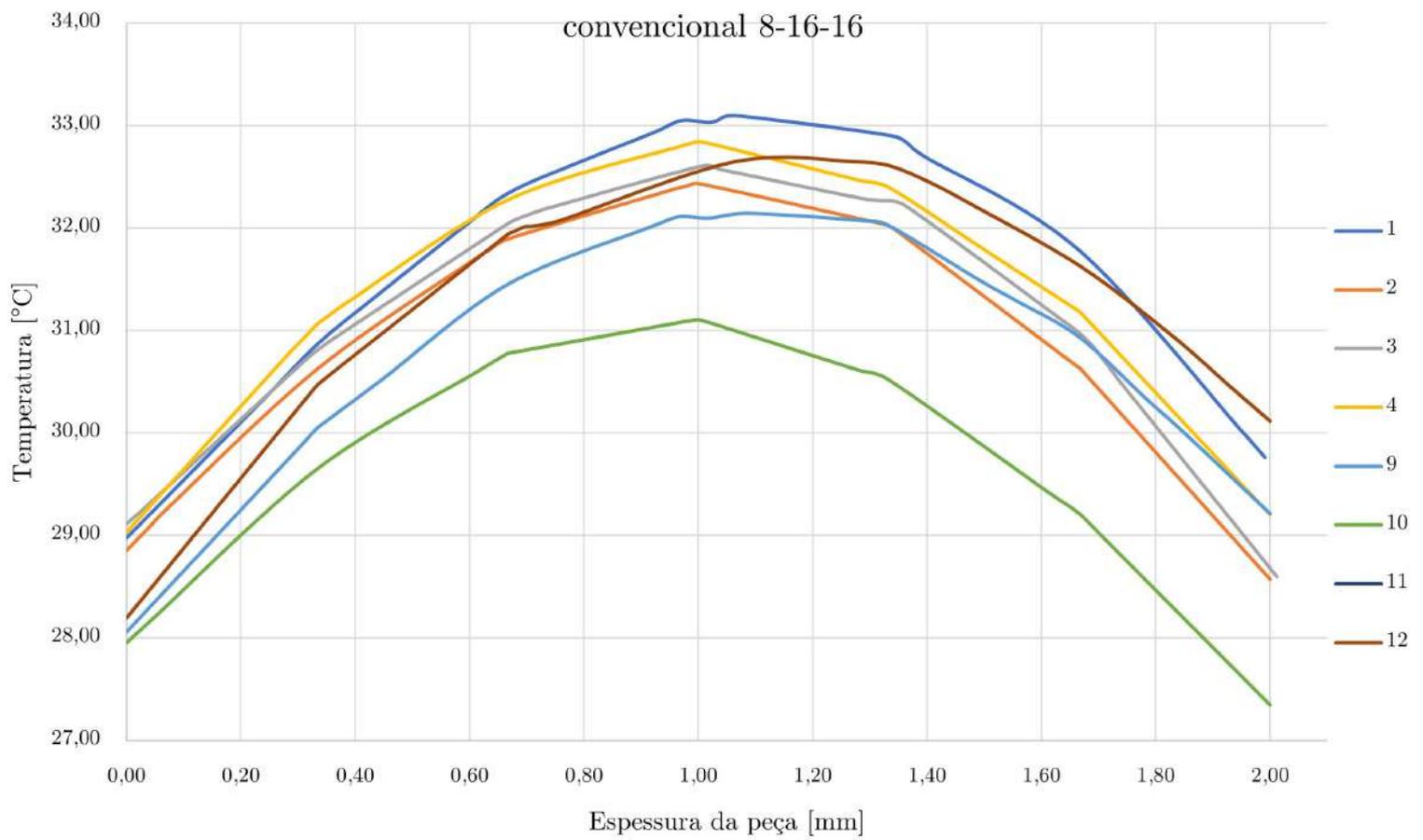
Anexo M

Gráficos da temperatura ao longo da espessura da peça nos estudos de arquitetura conformal de acordo com novas propostas

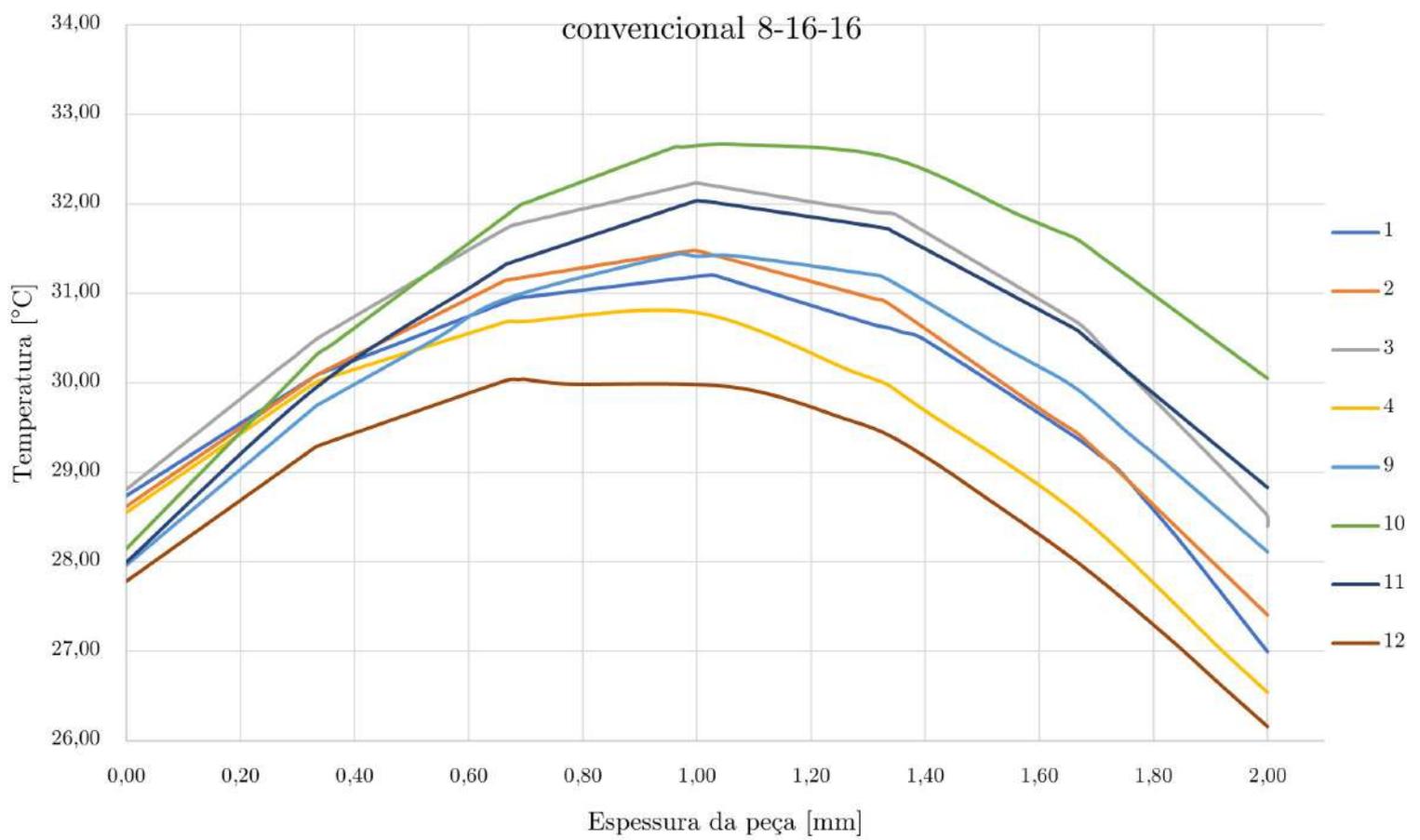
Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 4-5-9 e convencional 8-16-16



Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 4-5-9 e convencional 8-16-16



Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 6@3-8-6 e convencional 8-16-16



Temperatura ao longo da espessura da peça, canal conformal 6@6-7-10 e convencional 8-16-16

