U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2022

ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO COM CANAIS CONFORMADOS NUM MOLDE DE INJEÇÃO PLÁSTICA

DANIEL CORDEIRO DA SILVA LAGARTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM SETEMBRO 2022

ORIENTADOR PROFESSOR VITOR MARTINS AUGUSTO

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Candidato	Daniel Cordeiro da Silva Lagarto	*Código*	201604034
Título	Estudo da viabilidade de implementação do sistema de arrefecimento com canais conformados num molde de injeção plástica		
Júri	*Presidente*	Laura Maria Melo Ribeiro	DEMM-FEUP
	Arguente	Abílio Manuel Pinho de Jesus	DeMec - FEUP
	Orientador	Vítor Manuel Branco Martins Augusto	DEMM-FEUP

DATA	*16 de setembro de 2022*
HORA	*10h00*

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo.”

Thomas Edison

Resumo

Esta dissertação tem por base a otimização de sistemas de arrefecimento, um dos parâmetros do processo de injeção plástica. A engenharia dos moldes representa uma grande parte dos vários setores da indústria nacional e internacional como automóvel, médica e aeroespacial. A criação do molde com tecnologia de arrefecimento conformado em peças complexas e de multi cavidade é cada vez mais comum na indústria, o que faz que seja necessário evoluir os níveis de competitividade, complexidade e qualidade dos moldes. A indústria portuguesa de moldes é reconhecida pela sua qualidade de produção, o que permite no futuro investir numa perspetiva de desenvolvimento utilizando impressão 3D. Esta dissertação aborda o sistema de arrefecimento com canais conformados que estão a ser cada vez mais utilizados na indústria, assim como os desafios que esta tecnologia promove com a utilização de métodos de fabrico aditivo.

Palavras-chave: Arrefecimento conformado; Arrefecimento convencional; Tempo de arrefecimento; Ensaios reológicos; Análise de custo.

Abstract

This dissertation is based on the optimization of cooling systems, one of the parameters of the plastic injection process. The mold engineering represents a large part in several sectors of the national and international industry such as automotive, medical and aerospace. The creation of molds with conformable cooling technology in complex and multi cavity parts is increasingly common in the industry, which makes it necessary to evolve the levels of competitiveness, complexity and quality of the molds. The Portuguese mold industry is recognized by its quality, which allows in the future to invest in a development perspective using 3D printing. This dissertation will address the cooling system with conformal channels that are being increasingly used in the industry, as well as the challenges that this technology promotes with the use of additive manufacturing methods.

Keywords: Conformal cooling; Conventional cooling; Cooling time; Rheological tests; Cost analysis.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à instituição *FEUP*, nomeadamente ao Professor Vítor Augusto Martins por ter aceitado ser meu orientador, pelo seu suporte, dedicação, sabedoria e confiança.

De seguida, quero reconhecer à empresa *CADFlow*, especificamente ao Engenheiro João Paulo por ter aceitado ser meu orientador, pela seu apoio, confiança e sabedoria. Ainda dentro da empresa pretendo expressar a minha gratidão à equipa da *CADFlow*, particularmente aos Engenheiros Nuno Duarte, Miguel Teixeira e Hélder Godinho.

Por fim, mas não menos importante gostaria de demonstrar agradecimento ao Centro Tecnológico *Centimfe*, designadamente ao Engenheiro Luís Dias e a quem me acompanhou.

Índice

Resumo V
Abstract V
Agradecimentos VI
1.Introdução 1
1.1.Objetivos 1
1.2.A empresa *CADFlow* 2
2.Estado da Arte 3
2.1.Introdução 3
2.2.Canais conformados 3
2.2.1.Geometria dos canais 4
2.2.2.Requisitos para a conceção dos canais 6
2.2.3.Secção dos canais 6
2.2.4.Rugosidade dos canais 8
2.2.5.Fluido de arrefecimento 10
2.2.6.Construção dos canais 11
3.Trabalho Prático 12
3.1.Métodos e Metodologia 13
3.1.1.Ferramentas CAD – Criação dos canais 14
3.1.2.Simulação de injeção de plástico 18
3.1.3.Orçamentação do molde 21
3.2.Materiais 22
3.2.1.Peça: Makrolon 1260 22
3.2.2.Postiço de gravação do macho: Aço 2738 HH 23
3.2.3.Postiço de gravação da cavidade: Aço 2343 ESR 24
3.2.4.Materiais para fabrico aditivo: Aço Ferramenta 1.2709 26
4.Resultados e Discussão 27
4.1.Apresentação dos resultados 27
4.2.Discussão de resultados 34
4.3.Análise e Discussão de custos 37
4.3.1.Método convencional 37
4.3.2.Método conformado 39
4.3.3.Discussão de custo 42
5.Conclusão 47

6. Perspetivas de trabalho futuro 48
7. Bibliografia 49
8. Anexos 52
Anexo I 52
Anexo II 54
Anexo III 56

1.Introdução

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a influência da tecnologia dos canais conformados de arrefecimento atualmente utilizada para melhorar o processo de injeção na indústria dos moldes. Durante os seis meses de trabalho realizados na empresa *CADFlow* foi dedicado um período inicial à formação, antes do desenvolvimento dos trabalhos diretamente relacionados com o tema de dissertação: estudo da viabilidade da implementação do sistema de arrefecimento conformado. Assim, a formação base no programa *Siemens NX* foi concluída com sucesso e teve o intuito de possibilitar a realização de forma autónoma do tema proposto (Anexo I). A *CADFlow* possibilitou assistir às muitas formações *online* dadas diretamente pelos promotores dos programas da *Siemens* relacionados com fabrico aditivo, modelação convergente, desenho para controlo de produção de fabrico aditivo, estruturas treliçadas e otimização topológica.

Após uma pesquisa e discussão do tema com os orientadores, constatou-se que a utilização dos canais conformados nos moldes é pouco usada na indústria, especificamente na situação em que é produzido um reduzido número de peças, onde a implementação desta tecnologia não é viável.

Os projetistas de moldes não consideram este tipo de tecnologia pois existe a perceção de que a implementação da mesma apresenta poucos benefícios. Isto deve-se à falta de estudos e trabalhos num contexto real na indústria dos moldes. No entanto, para a implementação mais recorrente desta tecnologia é necessário que haja formação.

Com isto, surge a necessidade de estudar o custo-benefício para a implementação do sistema de arrefecimento conformado, num molde aplicado á indústria automóvel.

1.1.Objetivos

Os objetivos fundamentais para este caso de estudo foram os seguintes:

i. Criar os canais de arrefecimento conformado;
ii. Simular o arrefecimento nos canais criados;
iii. Estudar a eficiência dos canais conformados através da comparação com os canais convencionais, a partir dos resultados obtidos na simulação;
iv. Analisar em termos de custos e rentabilidade dos diferentes tipos de canais no processo de injeção plástica;

1.2.A empresa *CADFlow*

A *CADFlow* é uma empresa do *Grupo Vangest* (Figura 1) que centraliza a sua atividade no fornecimento e suporte técnico de soluções de gestão do ciclo de vida do produto (PLM - *Product Lifecycle Management*). Estas soluções utilizam sistemas que permitem a gestão de inúmeras bases de dados no decorrer de todo o ciclo de vida de um produto, de modo efetivo e económico. O PLM têm como objetivo ajudar as empresas a inovarem os seus produtos e processos.

A *CADFlow* tem criado durante os seus anos de atuação no mercado um sólido vínculo com a indústria, e atua nomeadamente nos setores dos moldes tanto automóvel como aeronáutica, assim como no desenho e desenvolvimento de produto como na metalomecânica. A equipa de técnicos formados e especializados auxilia o desenvolvimento de projetos com as aplicações PLM e proporciona todo o suporte necessário às empresas.

A *CADFlow* consegue dar resposta a todas as solicitações dos seus clientes, nomeadamente, à realização de estudos de simulação e análise de desempenho de produtos e processos, através dos diferentes tipos de aplicações especializadas para cada situação, o que reduz os custos de prototipagem física, economizando tempo e dinheiro.

Esta empresa faz a ligação entre as empresas internacionais de aplicações e o mercado português, nomeadamente, com empresas como *Siemens PLM*, *Autodesk*, *Materialise*, *Evatronix* entre outras. Para soluções inovadoras de simulação, esta apresenta soluções de realidade virtual da *ESI Group*, que favorecem a tomada de decisões em equipas interdisciplinares. Como não podia deixar de mencionar para o processo de fabrico aditivo é essencial ter as ferramentas mais adequadas para a manufatura, gestão e controlo do processo como, por exemplo, a aplicação da *Materialise Magics* [1].



Figura 1 – Vista aérea da empresa CADFlow em Leiria, Portugal [1].

2.Estado da Arte

2.1.Introdução

A utilização do fabrico aditivo no setor dos moldes de injeção mostra grande promessa no futuro para a criação de insertos com canais conformados de arrefecimento [2]. No entanto, pretende-se avaliar o seu desempenho em relação à eficiência e custos de fabricação. As tecnologias de aditivo metálico têm um papel influente na produção de moldes e nas suas ferramentas para a injeção de termoplásticos [3].

2.2.Canais conformados

O arrefecimento com canais conformados é uma alternativa aos canais tradicionais, que tem vindo a dar resultados promissores com uma aceitação crescente. Os canais conformados de arrefecimento seguem a geometria da peça para promover o arrefecimento mais rápido e homogéneo. Algumas geometrias que utilizam o sistema convencional, impossibilitam executar arrefecimento adequado e eficiente [3]. A diminuição da etapa de arrefecimento permite uma redução significativa, entre 35 a 70 %, no tempo de ciclo do processo, sendo possível uma poupança de energia, tempo e consequentemente dinheiro [4]. Uma vez que, a etapa de arrefecimento representa mais de dois terços do tempo total do ciclo de produção (*lead time*), é crucial que o sistema de arrefecimento esteja otimizado consoante a geometria dos elementos moldantes [5, 6]. Com o desenvolvimento do fabrico aditivo é possível aumentar a implementação destes sistemas nos moldes, sendo que as técnicas mais conhecidas para produzir moldes com a tecnologia conformada são DMLS e SLM [3]. Atualmente, moldes híbridos que usam insertos metálicos são constituídos por zonas com sistemas convencionais de arrefecimento produzidos por processos subtrativos, de menor custo, e por sistemas conformados presentes nas zonas mais complexas da peça, manufaturadas por processos aditivos [7, 8]. Para os insertos que possuem sistemas de arrefecimento conformado deve-se considerar que a resistência mecânica e a sua longevidade, uma vez que estes poderão não ter o mesmo tempo de vida que um molde criado por métodos tradicionais [4].

2.2.1.Geometria dos canais

A criação dos canais de arrefecimento é o último sistema a desenhar num molde. Isto faz com que existam vários obstáculos que impedem um desenho ideal para o sistema de arrefecimento, como por exemplo, sistema de injeção, elementos móveis, extratores e balancés [9]. Assim, os canais conformados são criados consoante o espaço disponível, contudo é possível seguir algumas estratégias como por exemplo, canais em série, em paralelo e em espiral.

Canais conformados em série:

Os canais conformados em série (Figura 2) são ligados num único circuito desde a entrada do líquido de arrefecimento até à saída do mesmo. Usualmente, estes são o tipo de canais de arrefecimento mais utilizados devido a aplicabilidade em peças de pequenas dimensões, onde os canais convencionais não têm tanta eficiência. Caso os canais conformados apresentem um diâmetro constante é possível que o fluido de arrefecimento evidencie um caudal idêntico ao longo de todo o circuito. O fluxo turbulento permite que a transferência de calor nos canais seja o mais eficiente apresentando um número de *Reynolds* superior a 4000 [10].

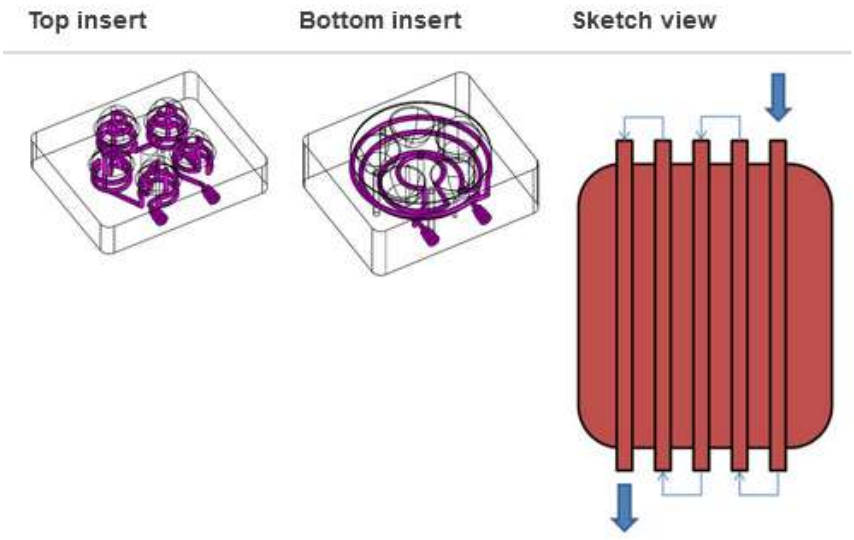


Figura 2 – Exemplo de canais conformados em série para inserto da cavidade e do macho [10].

Um dos exemplos mais comuns deste tipo de canais em série são zig-zag, espiral e rede (Figura 3). Estes são utilizados em peças de pequenas dimensões uma vez que para peças de grandes dimensões deixa de haver uniformidade no arrefecimento. Para peças com geometrias circulares é possível criar a espiral do exterior para o interior [11].

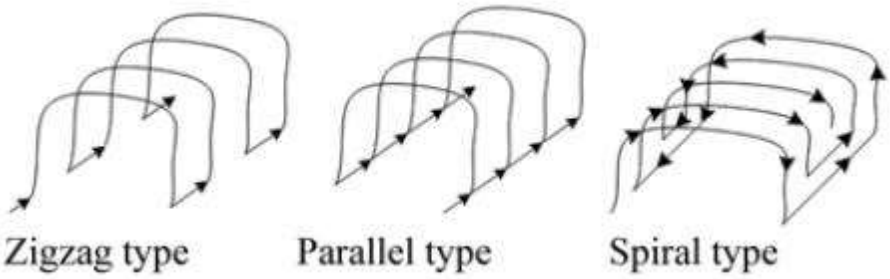


Figura 3 – Diferentes geometrias para os canais conformados [11]

Canais conformados em paralelo:

Os canais conformados em paralelo (Figura 4) são constituídos por coletores de entrada e saída do líquido de arrefecimento e pelos respetivos circuitos. Estes coletores são maquinados através de métodos de furação, na qual o fluido apresenta um percurso desde o coletor de abastecimento até ao coletor de recolha. O coletor de recolha é projetado com um diâmetro maior que os canais conformados. Esta estratégia pode apresentar diferentes caudais ao longo dos vários circuitos devido a estes evidenciarem diferentes resistências ao fluxo por causa das suas geometrias. Caso esta situação ocorra vai-se evidenciar uma perda da eficiência da transferência de calor. Para que a eficiência não varie de um canal para os outros, assegurando a uniformidade e o equilíbrio é necessário um caudal elevado [10].

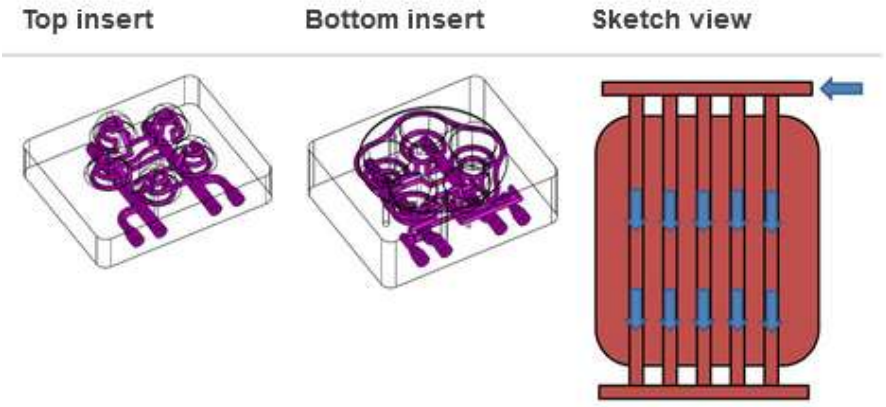


Figura 4 - Exemplo de canais conformados em paralelo para inserto da cavidade e do macho [10].

Caso o circuito desenhado seja demasiado comprido e ultrapasse os 2ºC de diferença entre a temperatura de entrada e saída do canal é necessário que este seja dividido em circuitos de menor comprimento [11].

2.2.2.Requisitos para a conceção dos canais

O posicionamento dos canais de arrefecimento no molde vai variar consoante o diâmetro dos canais conformados. Com isto, a distância entre o centro dos canais e a peça, e a distância entre os centros dos canais são regras que são necessárias cumprir para garantir a correta implementação deste sistema (Figura 5) [12, 13].

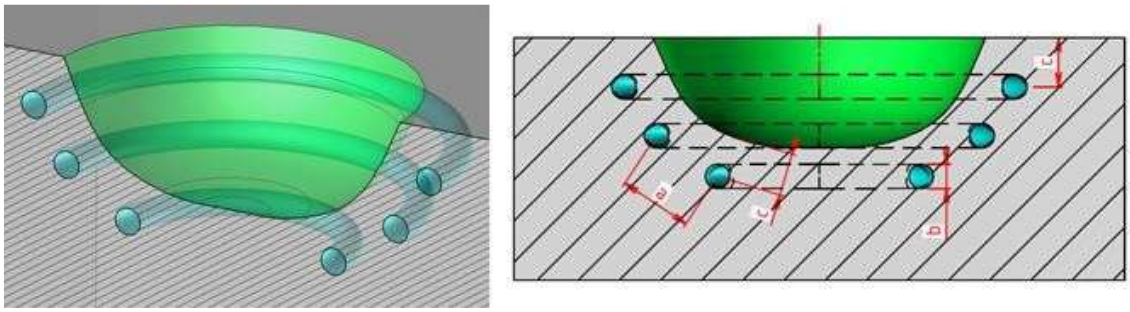


Figura 5 – Ilustração esquemática do posicionamento dos canais conformados. Em 3D (à esquerda) e corte transversal (à direita) [12, 13].

Os parâmetros necessários a cumprir para a conceção do sistema de arrefecimento conformado estão descritos na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para a conceção de um circuito de arrefecimento conformado [12, 13]

Espessura de parede da peça a injetar [mm]	Ø Canal (b) [mm]	Distância entre centros dos canais (a) [mm]	Distância entre centro dos canais e cavidade (c) [mm]
< 2	4 - 8	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b
2 - 4	8 - 12	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b
4 - 6	12 - 14	[2 ; 3] * b	[1.5 ; 2] * b

2.2.3.Secção dos canais

Para o sistema de arrefecimento conformado é possível criar diferentes secções para os canais devido a estes serem produzidos por métodos de fabrico aditivo. O principal objetivo para a modificação das secções dos canais foca-se no aumento da eficiência das trocas de calor. Isto advém do aumento da área de superfície do canal promovendo maiores trocas de calor. Estas secções também podem proporcionar o aumento da turbulência do fluxo que facilita igualmente o aumento das trocas de calor. A alteração da secção pode também ser utilizada para o melhor acompanhamento do sistema de arrefecimento em relação à zona moldante.

No sistema convencional utiliza-se obrigatoriamente secções de canais com geometrias circulares devido ao processo de maquinagem (furação) permitir somente a criação dos canais com este formato. No entanto, para o sistema conformado pode-se obter secções com geometrias circulares, elípticas, gota de água, quadradas e *fluted*. Outras geometrias para as secções dos canais podem existir devido a liberdade geométrica do processo de fabrico aditivo [14]. Contudo, o objetivo das secções em *fluted* é aumentar a turbulência do fluxo do líquido de arrefecimento dentro do canal, melhorando desta forma as trocas de calor entre o fluido de refrigeração e a peça. Este tipo de secção é o que apresenta maior área de superfície permitindo melhores trocas de calor [15].

As dimensões específicas para as diferentes geometrias da secção para os canais conformados estão descritas na tabela 2. Sendo que *As* representa a área da secção dos canais conformados em mm^2, *P* o perímetro do canal conformado em mm, *Dh* o diâmetro hidráulico da secção do canal conformado e *Sc* definido por rácio entre perímetros da secção dos canais conformados [14, 15].

Tabela 2 – Dimensões para as diferentes geometrias de secção dos canais conformados [14, 15]

	Unidades	**Circular**	**Elíptica**	**Gota de água**	***Quadrada***	***Fluted* Circular 1mm**
As	mm^2	28,27	27,49	35,93	36,00	39,27
P	mm	18,84	18,98	22,77	24,00	30,25
Dh	mm	6	5,79	6,31	6	5,19
Sc	mm	1	1,003	1,209	1,274	1,606

O diâmetro hidráulico (*Dh*) e rácio entre perímetros de secção (*Sc*) é calculado pelas seguintes fórmulas [14, 15]:

$$Dh = 4\left(\frac{As}{P}\right)$$

$$Sc = \frac{Psecção}{Pcirculo}$$

A Figura 6 apresenta as formas de secção complexas para os canais conformados de arrefecimento que apresentam melhor desempenho.

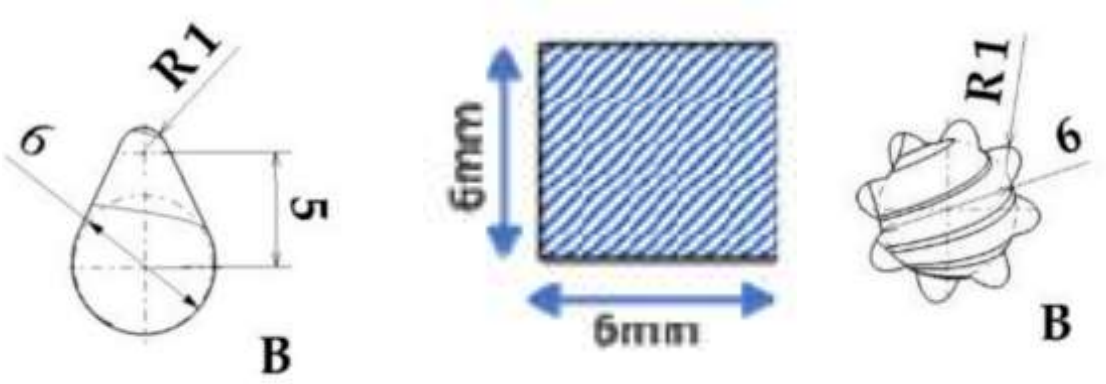


Figura 6 – Formas de secção utilizadas nos canais conformados de arrefecimento [14, 15].

Contudo, os projetistas de moldes devem ter em consideração a orientação da peça na câmara de impressão, uma vez que este é um parâmetro fundamental para que estas secções apresentem uma estrutura auto suportada. Por exemplo, um canal com a geometria de gota de água é auto suportada se a zona circular de maior diâmetro for orientada para a base de impressão. A Figura 7 representa o efeito da orientação de construção da secção para a criação de uma estrutura auto suportada. [16].

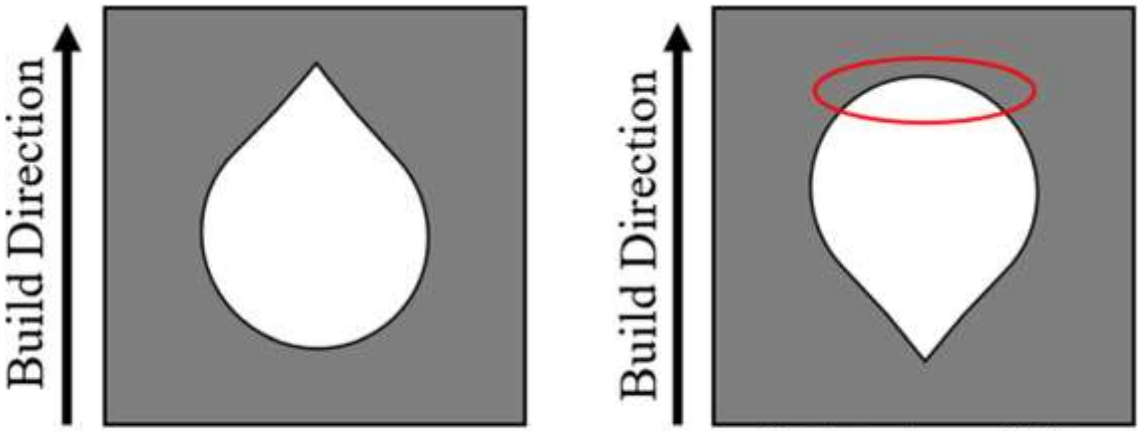


Figura 7 - Efeito da orientação de construção da secção. Canal de arrefecimento com estrutura auto suportada (à esquerda) e não auto suportada (à direita) [16].

2.2.4.Rugosidade dos canais

A baixa rugosidade nas paredes internas dos canais conformados é um desafio para os fabricantes dos moldes, sendo que esta afeta o fluxo dos canais conformados, aumentando assim o fator de fricção. Para reduzir a rugosidade superficial é necessário recorrer a um pós-processamento, pois com a utilização unicamente dos processos aditivos é muito difícil obter rugosidades superficiais comparáveis com o método tradicional de maquinagem [17]. Normalmente, o

processo aditivo de SLM apresenta uma rugosidade entre 10 a 15 µm, na qual é solicitado na indústria dos moldes que as ferramentas apresentarem rugosidades na ordem dos 8 µm [16]. Assim, nem todos dos métodos de redução da rugosidade da superfície como acabamentos por maquinagem são fisicamente possíveis para as aplicações que requerem suavização de estruturas internas como os canais conformados.

Atualmente, já são utilizados alguns procedimentos para o acabamento dos canais conformados como maquinagem de fluxo abrasivo, jato de areia e tratamentos térmicos após impressão. Contudo, a qualidade da superfície pode ser melhorada através do uso do método de refusão que consiste na utilização do laser durante a construção da peça para refundir as camadas já impressas. A Figura 8 demonstra a superfície de um aço, observe-se que existe uma redução da rugosidade superficial utilizando o método de refusão [17].

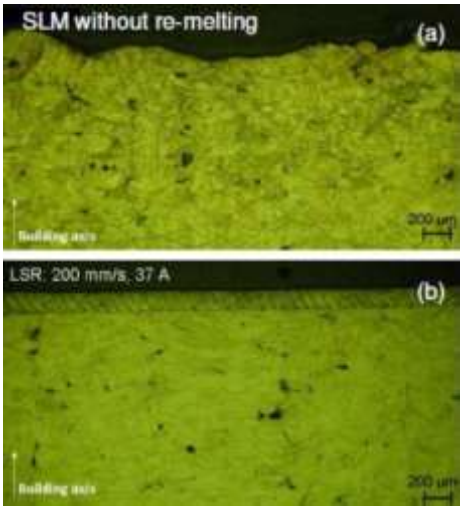


Figura 8 – Qualidade da superfície fabricada com SLM (a) sem refusão e (b) com refusão [17].

A qualidade da superfície dos canais conformados de arrefecimento pode estar associada à orientação da peça na câmara de impressão, sendo este um parâmetro para ter em conta na criação do sistema de arrefecimento. Na utilização de canais de diâmetros reduzidos é necessário ter em atenção a utilização de fluidos de refrigeração tratados, de forma a impedir a obstrução dos canais [7], no entanto, o uso de filtros de impurezas e os revestimentos dos canais de arrefecimento com laca ou por niquelagem, podem prevenir a corrosão [18].

2.2.5.Fluido de arrefecimento

Fluxo turbulento

Os canais conformados de arrefecimento devem permitir a transferência de calor com eficiência para obter o menor tempo de arrefecimento, e consequentemente, menor tempo de ciclo. Desta forma, os canais devem apresentar um regime de fluxo turbulento para atingirem uma taxa de transferência de calor mais eficiente. Para alcançar o regime turbulento é necessário que o tipo de fluxo seja caraterizado com um número de *Reynolds* superior a 4000. Este pode ser obtido através das mudanças de direção dos canais promovendo o aumento da turbulência, como também pode ser afetado pelas caraterísticas do fluido (densidade, média da velocidade e viscosidade) [19]. A Equação 1 mostra a fórmula para calcular o número de *Reynolds*.

$$Re = \frac{\rho U d}{\eta} \quad (1)$$

Em que ρ é a densidade do fluido de arrefecimento, U é a média da velocidade do fluido de arrefecimento, d é o diâmetro do canal de arrefecimento, e η é a viscosidade dinâmica do líquido de arrefecimento. O tipo de fluxo do líquido de arrefecimento pode ser definido pelo número de *Reynolds* (Re), como demonstra a Tabela 3 [20]:

Tabela 3 – Tipo de fluxo do fluido de arrefecimento [20]

Número de Reynolds	Tipo de fluxo
4 000 < *Re*	Turbulento
2 300 < *Re* < 4 000	Transitório
100 < *Re* < 2 300	Laminar
Re < 100	Estagnado

Tipo e temperatura do líquido de arrefecimento

Normalmente, os tipos de líquidos de arrefecimento são água, óleo ou misturas de líquidos [19]. Quando o molde é operado a temperaturas superiores a 100ºC é necessário utilizar óleo como líquido de arrefecimento, uma vez que não evapora dentro do circuito de arrefecimento. Ao contrário da água, que não pode ser utilizada nestas situações, visto que se está a operar à sua temperatura de ebulição. A utilização de temperaturas elevadas na superfície do molde e no líquido de arrefecimento impede a criação de tensões indesejáveis quando existe um arrefecimento muito rápido [19]. Uma mistura de água e glicol pode também ser uma escolha para líquido de arrefecimento. Uma mistura muito concentrada de glicol no sistema provoca uma diminuição da taxa de fluxo devido à alta viscosidade que este apresenta. Contudo, é

necessário estudar o custo benefício da utilização deste fluído devido ao seu elevado custo. Ao contrário da água, que é uma escolha com reduzido custo, na qual só necessita de ser aquecida à temperatura desejada para o sistema, normalmente, 20ºC inferior à temperatura do molde. Apesar do glicol proporcionar um arrefecimento rápido pode não ser o suficiente para justificar o custo adicional podendo ser a água a melhor escolha [19].

2.2.6.Construção dos canais

Os canais conformados de arrefecimento são produzidos utilizando métodos de fabrico aditivo, sendo estes criados com maior liberdade geométrica, devido ao seu processo de fabrico. Atualmente, um dos métodos mais utilizados é o processo de *Seletive Laser Melting* SLM, no entanto, ainda se pode usar o processo de *Direct Metal Laser Sintering* DMLS. A grande diferença entre os dois processos é o método de aquecimento do pó metálico. No processo de SLM o pó é completamente fundido, enquanto no DMLS não chega a fundir na totalidade, sinterização, pelo que é necessário menos energia. Com isto, as propriedades mecânicas das peças de SLM são melhores devido ao facto de a fusão completa dos pós e a posterior solidificação permitir criar peças com elevada densidade [21]. Desta forma, deve-se ter em consideração um conjunto de fatores importantes para a obtenção de resultados eficientes com o método de fabrico aditivo que estão demonstrados em seguida [8, 22].

A diminuição do volume e altura da peça minimiza consideravelmente o tempo e custo de impressão. Assim, ao reduzir a altura da peça conseguimos reduzir o número de camadas que o laser tem de fundir durante o processo e consequentemente o tempo que o mesmo está em funcionamento.

O posicionamento da peça na câmara de impressão influencia o tempo de produção, mas também interfere na precisão da geometria, associada à rugosidade e na criação de estruturas auto sustentadas.

A espessura da camada de pó determina consideravelmente a precisão dimensional da peça, o tempo de produção e a rugosidade superficial. Quanto menor for a espessura da camada maior a precisão geométrica atingida, contudo maior tempo e o custo de fabrico.

A conceção por camadas de uma superfície com inclinação resulta no efeito conhecido de “efeito escada”, na qual a forma da peça torna-se numa aproximação do pretendido, isto significa, que quanto maior o ângulo entre a superfície produzida e a plataforma de construção, maior é a rugosidade obtida. Sendo que durante a impressão da peça cria-se uma sobre espessura de maquinagem de 0,5 mm para posteriormente fazer o acabamento em zonas exteriores do molde.

O uso de estruturas de suporte é aconselhado para ângulos críticos de 45º±10º em relação ao eixo horizontal da plataforma de construção. Os suportes da peça são recomendados para impedir ângulos críticos, sendo mais complexo a remoção destes suportes no interior dos canais conformados do que no exterior da peça.

Quaisquer furos devem estar incluídos na peça ao ser produzida, desta forma diminui-se o volume da peça a imprimir, e por sua vez, os custos de fabrico aditivo e de processos adicionais [8, 22].

3.Trabalho Prático

Para o propósito desta dissertação a empresa *Azemoldes - Molding Technologies* disponibilizou um molde de injeção plástico em formato digital, com o objetivo de implementar um sistema conformado de arrefecimento. O molde fornecido pela empresa é utilizado na indústria automóvel para a produção de um componente de natureza polimérica da luz de travagem do *Renault ZOE 2020* (Figura 9).



Figura 9 – a) Aplicação da peça em situação real e b) modelo 3D da peça em questão.

O projeto CAD do molde que serve para produzir este componente foi concebido pela empresa *Azemoldes – Molding Technologies* apresenta visualizadores dinâmicos que facilitam a análise rápida da geometria.

3.1.Métodos e Metodologia

O projeto de molde utilizado neste caso de estudo encontra-se atualmente em utilização para a produção de um componente na indústria automóvel. Por sua vez, este foi sujeito a um estudo reológico através da aplicação Moldflow em subcontrato à CADFlow. Após discussão com a equipa de orientação da empresa foi decidido realizar um estudo comparativo com o novo sistema de arrefecimento conformado. A metodologia utilizada para a criação de um sistema de arrefecimento conformado adequado recorreu a três diferentes aplicações (Figura 10). Para a implementação deste sistema foi necessário a análise e preparação dos elementos moldantes.

Inicialmente, utilizou-se a aplicação *Siemens NX* para preparar os elementos moldantes e criar os canais de arrefecimento, sendo que estes sofreram várias iterações antes de chegar à etapa de simulação. De seguida, após várias exportações da aplicação de modelação com os canais pretendidos gerou-se um ensaio de simulação. Desta forma, conseguiu-se estudar a eficiência do sistema de arrefecimento podendo ser comparado com o sistema convencional já existente. Com isto, usou-se três tempos de simulação. Um dos tempos é igual ao tempo de arrefecimento do sistema convencional e a partir daí recorreu-se a tempos cada vez mais curtos consoante as caraterísticas da peça.

Finalmente, após a obtenção dos resultados reológicos adequados prosseguiu-se para a análise financeira em relação à viabilidade da implementação deste sistema. Deste modo, foi possível estudar o custo benefício para a implementação deste sistema. Contudo, este estudo não só permite a otimização antes da fase de produção como também o estudo da implementação da tecnologia correta para a situação em questão.

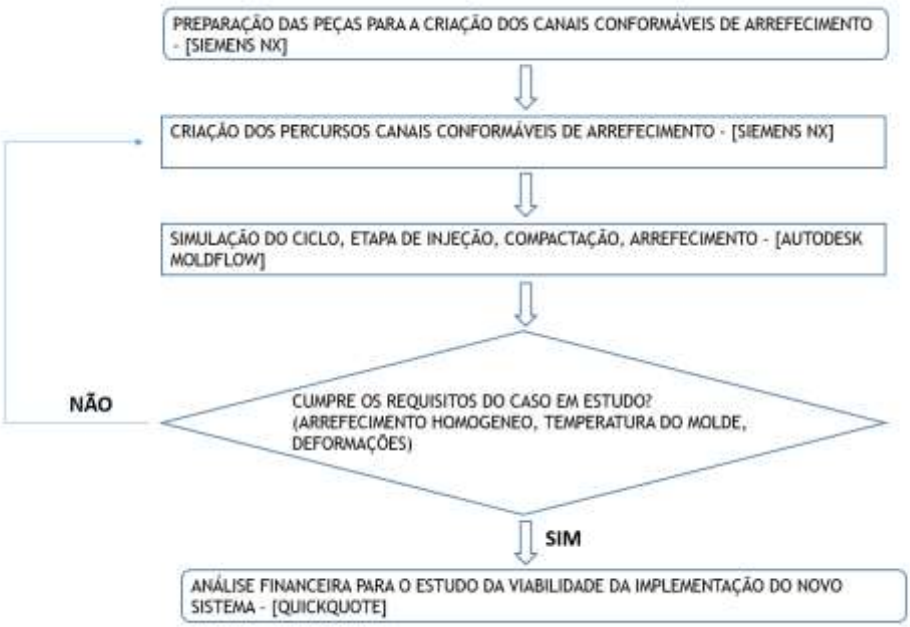


Figura 10 – Fluxograma do curso de trabalho da parte prática da dissertação.

3.1.1.Ferramentas CAD – Criação dos canais

O *Grupo Vangest* comercializa o *Siemens NX*, *Catia* entre outras aplicações disponíveis no mercado, contudo, a *CADFlow* comercializa exclusivamente aplicações da *Siemens*. Dentro das opções da *Siemens*, o *NX* é o programa mais avançado e sofisticado com grande representatividade na indústria automóvel. Recentemente foi adicionado na aplicação um módulo especializado para a criação de canais de conformados possuindo comandos conhecidos como *Conformal Cooling Channel*. A aplicação *Siemens NX*, na versão 2021 da série 2007 apresenta o *kernel* de *Parasolid 34.0* na qual possui vários módulos como a modelação síncrona, simulação elétrica e mecânica, maquinagem, fabrico aditivo e desenvolvimento de ferramentas. A utilização da aplicação *Siemens NX* facilita a criação e a edição de modelos de CAD 3D mais rápida através da tecnologia síncrona. Esta tecnologia combina a velocidade e a simplicidade da modelação direta com a flexibilidade e o controlo do desenho paramétrico. A tecnologia síncrona do programa *Siemens NX* permite criar, alterar e atualizar simultaneamente múltiplas peças dentro de um conjunto. O poder da tecnologia permite tratar ficheiros CAD como se fossem arquivos nativos. A *Siemens* desenvolveu um ecossistema dedicado à interligação deste programa com a aplicação *Teamcenter* que permite ampliar as capacidades de simulações mais complexas, planeamento de produto e processos complexos,

simplificando as operações e consequentemente a tomada de decisões [23, 24].

Na realização desta dissertação, esta aplicação foi utilizada exclusivamente para a modelação de canais de arrefecimento através dos módulos de *Conformal Cooling* e *Mold Wizard*. Para tal, foi necessário obter formação base neste programa começando por fazer um curso disponibilizado e lecionado pela *CADFlow*. O curso de *NX Base* consiste na aprendizagem de *sketch*, modelação de sólidos e superfícies e assemblagens. No entanto, foi possível obter formação extra em *NX Additive Manufacturing* como por exemplo, *Convengent Modeling*, *Lattice Struture*, *Topology Optimization* e *AM Checkers*.

Uma vez que o molde original apresenta um sistema convencional de arrefecimento, o primeiro passo focalizou-se na remoção dos canais com a finalidade de obter um modelo limpo e tratado para a implementação dos novos canais. A função *Delete Face* incorporada no separador de modelação síncrona, com a opção *Heal* ativa permite eliminar os canais convencionais presentes inicialmente no molde (Figura 11). No final desta etapa temos o espaço disponível para incorporar os novos canais sem comprometer a estrutura original do molde mantendo o resto dos componentes como furos dos extratores, pinos de fixação e ponto de injeção.

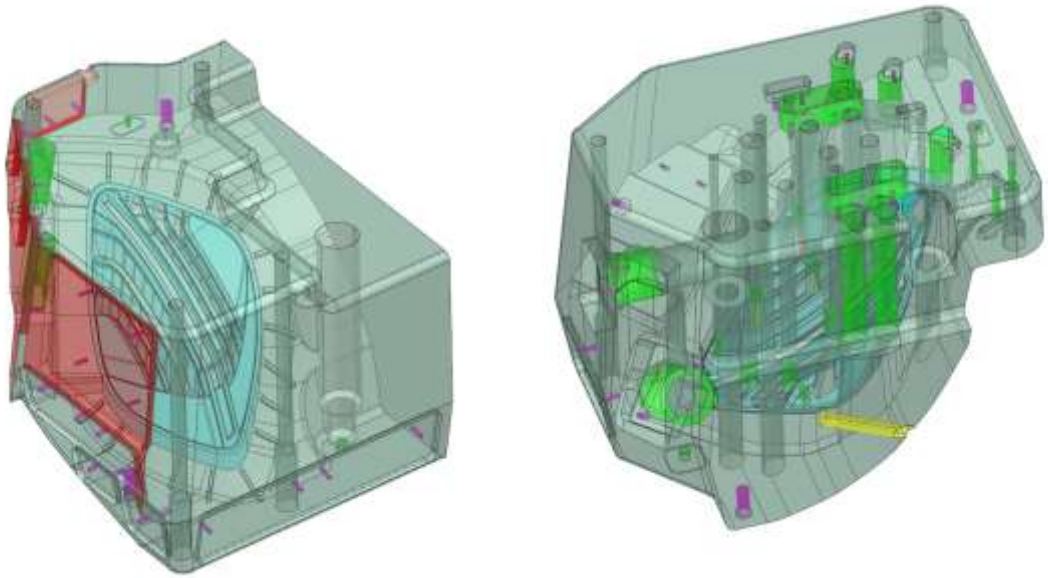


Figura 11 – Meia moldação sem canais de arrefecimento. Cavidade à esquerda e macho à direita.

No caso da moldação do macho é utilizada uma cópia da geometria dos extratores como referência para criar as linhas centrais dos novos canais. Isto deve-se ao facto de não existir muito espaço disponível na moldação do macho para criar os canais conformados através da projeção de linhas, que é o método mais habitual. Neste caso, utiliza-se comandos síncronos como *Copy Face*, *Move Face*, *Offset Face*, *Virtual Extract Geometry* para obter as linhas principais ou de referência destes canais. Em seguida, cria-se a ligação entre os canais de modo a fazer a ponte entre eles, originando os percursos próximos à superfície moldante. Após a criação destas linhas de referência cria-se uma *Spline* (Curva 3D) com a vantagem de se poder ajustar a curva de forma mais orgânica, evitando que os tubos dobrem nas curvaturas aquando a sua implementação (Figura 12). Ao respeitar a regra na qual o raio do arco apresenta um valor maior que o diâmetro do tubo conseguimos garantir que não existe nenhuma torção ou dobra no tubo.

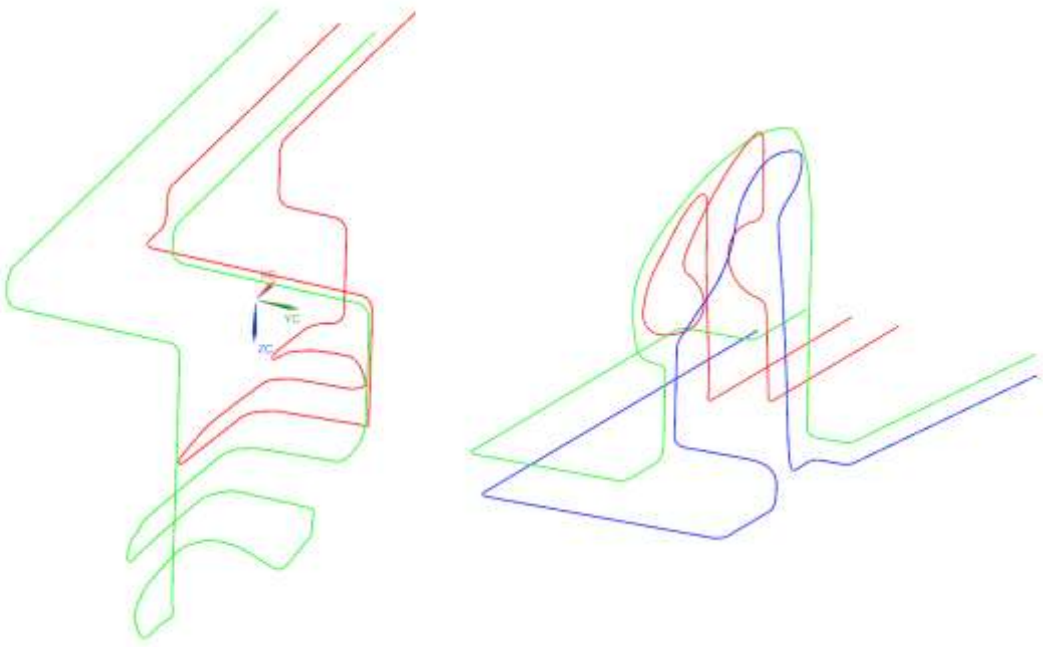


Figura 12 - Linhas de referências dos canais conformados. Cavidade à esquerda e macho à direita.

Na situação da moldação da cavidade começa-se por criar linhas num *Sketch* com a forma dos canais conformados e posteriormente projeta-se as mesmas com a respetiva configuração (Figura 13). Caso seja necessário algum ajuste nas linhas criadas para os canais pode-se utilizar a modelação

por curvas para auxiliar a chegar ao resultado final que pretendemos visualizar.

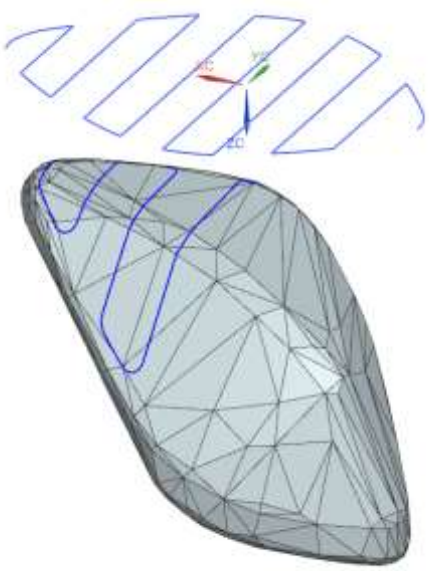


Figura 13 – Projeção das linhas de referência dos canais conformados através de um Sketch.

Na criação dos canais conformados, nas duas moldações, aplica-se o comando *Conformal Cooling Curve* na qual apresenta várias opções para criar as curvas e canais pretendidas, seja por *Existing Curve*, *Intersection* ou *Projection*. O comando de *Projection* consiste na projeção de uma geometria para um sólido existente, neste caso, projetar as linhas de *Sketch* para uma superfície ou face que foi originada por um *Offset* em relação à superfície da cavidade moldante, cumprindo assim a distância recomendada entre os canais e a superfície de moldação. Quando as curvas estão criadas sem que haja descontinuidade, tornando-se uma linha única, sob a forma de *Spline*. Finalmente usa-se o comando *Existing Curves* que permite a criação e a suavização dos canais através das linhas existentes (Figura 14).

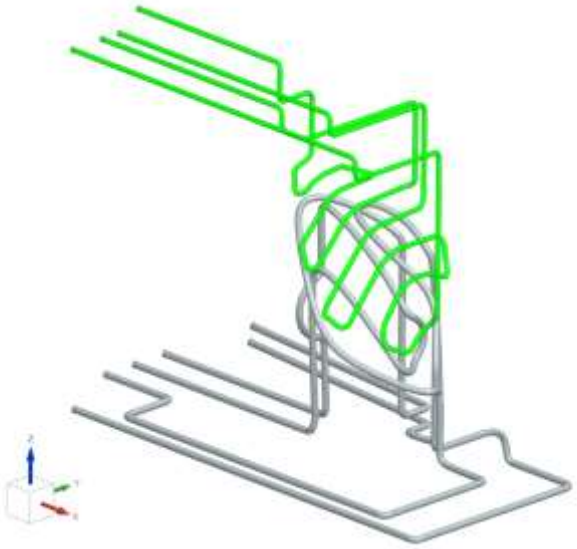


Figura 14 – Geometria dos canais conformados.

Em relação à moldação do macho, a criação dos canais conformados demonstra que o processo é complexo, não sendo possível implementar uma estratégia comum de arrefecimento conformado (zig-zag, espiral ou malha), por causa do escasso espaço existente na moldação. A falta de espaço na moldação do macho deve-se à quantidade de extratores, elementos móveis e balancés existentes neste molde. Logo, é necessário implementar uma estratégia em série com a geometria dos canais livres de modo a garantir que os canais acompanhem a superfície moldante do macho. Não foi utilizado uma estratégia em paralelo em consequência dos problemas de uniformidade de caudal que esta estratégia apresenta logo, o mais indicado para contornar este problema foi a utilização de uma estratégia em série. A subdivisão dos canais conformados, em vários canais teve como objetivo garantir que a temperatura de entrada e saídas destes não ultrapassava 1,5ºC.

3.1.2.Simulação de injeção de plástico

A escolha da aplicação *Moldflow Synergy* entre outras disponíveis no mercado (*Moldex 3D*) deve-se ao facto de o estudo convencional de arrefecimento (original) já ter sido feito no *Moldflow* e por sua vez este também ser comercializado pela *CADFlow*. Este programa da *Autodesk* é o mais especializado para a criação de ensaios reológicos para o arrefecimento conformado apresentando uma biblioteca de materiais mais alargada. A aplicação *Autodesk Moldflow Synergy 2021.2*, programa dedicado à simulação do processo de injeção plástica, entre outros, usa a análise de

elementos finitos (FEA) para a criação de ensaios reológicos. Com o apoio técnico da equipa *CADFlow*, foi possível a realização destes ensaios reológicos, possibilitando assim a obtenção dos resultados mais precisos, de forma a fazer a correta avaliação dos parâmetros assim como, a comparação e análise dos diferentes sistemas de arrefecimento. Assim, foi possível obter parâmetros como a eficiência da geometria dos canais de arrefecimento, acumulação de calor na peça e no molde, diferença de temperaturas de entrada e saída dos canais e avaliação de defeitos como marcas de contrações e deformação da peça [25].

Para a realização de uma análise de arrefecimento conformado, a peça, os canais conformados de arrefecimento e o molde devem estar adequadamente modelados. Como por exemplo, canais sem dobras ou torções, linhas de referência dos canais sem descontinuidades, peça e elementos moldantes apresentarem encaixe sem folgas entre os mesmos.

A criação de uma análise de arrefecimento conformado iniciou-se com a importação do modelo CAD da peça, a qual foi transformada em malha do tipo Sólido 3D (*Solid 3D*) ou Duplo Domínio (*Dual Domain*). De seguida selecionou-se a sequência de análise que inclui *Cool (FEM)*, onde é automaticamente atualizada na árvore de estudo (histórico) para englobar os passos indispensáveis para completar este tipo de análise. Depois selecionou-se o material plástico a ser utilizado para a peça em estudo, neste situação, *Covesto Makrolon 1260*.

Em seguida, o requisito mínimo para criar o sistema de alimentação é que seja definido um único local de injeção, no caso em estudo, o molde já apresentava sistema de injeção com o canal (*cool gate*) e respetivo localização do bico de injeção. Seguidamente, o sistema de arrefecimento foi criado através das linhas referência e dos canais, já definidos e modelados anteriormente. Sendo que neste caso em particular as linhas referência dos canais e os próprios canais foram importados da aplicação *Siemens NX* e posicionados no local correto. Desta forma, definiu-se a entrada e saída do fluido de arrefecimento para os canais conformados, sendo que o posicionamento das entradas e saídas dos canais pode influenciar o arrefecimento. O objetivo é que a entrada do canal se localize numa zona mais perto do interior da peça, onde o fluido entra a uma temperatura mais baixa.

Posteriormente é necessário modelar os elementos moldantes. Contudo, a simplificação do molde é fundamental, eliminando quaisquer elementos móveis, parafusos, pinos de fixação, etc. No entanto, pode-se criar um bloco como molde para a versão mais simplificada do mesmo, sendo necessário incluir espaços vazios para a peça, canais e elementos de alimentação. Neste caso, optou-se pela criação do bloco sendo a versão mais simplificada de um molde.

Subsequentemente criou-se a malha 3D dos canais, sendo que na cavidade apresentava 2 canais conformados e no macho 3 canais conformados. De seguida criou-se a malha 3D do molde, na qual este processo dividiu-se em duas fases, sendo a primeira a criação de uma malha de superfície do molde e a segunda a criação da malha para o volume do molde.

Finalmente definiu-se alguma configuração do processo necessária que esteja em falta e prosseguiu-se à execução da análise [26].

Na Figura 15 está demonstrado o resultado final da preparação do modelo que vai ser usado para a criação das análises reológicas.

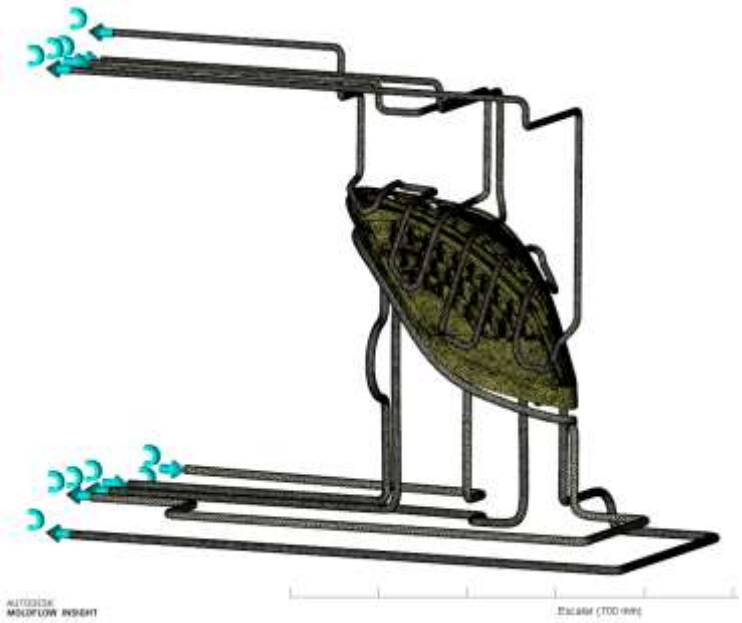


Figura 15 – Modelo 3D malhado preparado para os ensaios reológicos.

Através da análise reológica consegue-se estudar o comportamento dos materiais no processo de injeção, utilizando parâmetros já alguns deles conhecidos para obter soluções. Neste caso, o tempo de arrefecimento é o fator que queremos calcular tendo em conta que não existe a alteração de outras caraterísticas no processo. Assim, podemos usar o estudo do sistema convencional como padrão, sendo que todos os resultados obtidos foram comparados com o mesmo.

Contudo, podemos definir parâmetros não-variáveis e parâmetros variáveis consoante os diferentes estudos reológicos do sistema conformado de arrefecimento. Como foi utilizado o mesmo material para o enchimento, os

parâmetros relacionados com material não serão alterados. Para que haja uma comparação precisa enfatizando somente a influência do sistema de arrefecimento, os restantes parâmetros do ciclo vão se manter caso estes façam sentido e estejam adequados à situação.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para gerar os ensaios reológicos no caso de estudo.

Tabela 4 – Parâmetros não-variáveis e variáveis nos ensaios reológicos

Parâmetros não-variáveis	**Parâmetros variáveis**
Temperatura de injeção (300 ºC)	Temperatura da peça (ºC)
Temperatura de transição vítrea (150ºC)	Temperatura da superfície da cavidade do molde (ºC)
Temperatura de extração (130 ºC)	Temperatura de entrada e saída dos canais (ºC)
Temperatura do molde (100 ºC)	Empeno (mm)
Temperatura do líquido de arrefecimento (80 ºC)	Marcas de contrações (mm)
Tempo de injeção (2,2 s)	Tempo de arrefecimento (s)
Tempo de compactação (17,8 s)	
Tempo de abertura e fecho (5 s)	

3.1.3.Orçamentação do molde

A escolha da aplicação *QuickQuote* deve-se ao facto de ser necessário um estudo económico para avaliar a viabilidade da implementação do sistema de arrefecimento conformado. Desta forma, recorreu-se a esta ferramenta de orçamentação a qual é comercializada pela *CADFlow* sendo esta mais especializada em orçamentação de moldes convencionais. A aplicação *CADFlow QuickQuote* tem como objetivo a orçamentação rápida e precisa para moldes de injeção, desenvolvido internamente pela própria *CADFlow*. Assim, a criação de uma ficha técnica com todos os valores discriminados permitiu prever o custo de criação, fabricação e implementação de um molde. Na conclusão desta dissertação, este programa foi importante para estudar e avaliar a viabilidade da implementação do novo sistema de arrefecimento, comparando os custos de um orçamento em fabrico aditivo com um orçamento de maquinação convencional [27].

Para a orçamentação do molde em estudo foi necessário retirar as dimensões máximas do mesmo para introduzir na aplicação. Com a adição

de mais informações como acabamento superficial da peça e tipo de materiais para cada componente, este programa consegue calcular o valor do custo de produção do molde. Assim, este programa gera uma folha de orçamento em formato *Excel* e PDF com todas as operações necessárias à construção do molde, com o respetivo tempo e custo de cada operação.

Posteriormente, com a utilização dos valores de orçamentação procedeu-se à análise de custos que consiste na comparação dos dois tempos de arrefecimento no método conformado com o método convencional. Isto foi possível através do cálculo do tempo de funcionamento da máquina de injeção e do custo previsto para a produção de 750.000 peças. Com base em toda esta informação consegue-se gerar tabelas e obter gráficos facilitando a discussão financeira dos mesmos. A análise do aumento do número de peças foi considerada assim como a diminuição do tempo de arrefecimento.

3.2.Materiais

3.2.1.Peça: Makrolon 1260

O componente é composto de policarbonato, um material termoplástico que apresenta como principais propriedades baixa densidade, alta resistência ao impacto e transparência (Figura 16). Estas caraterísticas são ideais para aplicações automóveis, mais especificamente para componentes dos faróis. Este material da família dos polímeros é translúcido à luz visível, com melhor transmissibilidade de luz do que alguns tipos de vidro, no entanto é fortemente suscetível a riscos e aos raios ultravioleta provocando degradação, pelo que é necessário utilizar um revestimento para aplicações exterior do automóvel. O policarbonato apresenta uma alta durabilidade quando sujeito a altas temperaturas, uma vez que a temperatura de transição vítrea é de 142 ºC, e a temperatura de fusão de 280 ºC (Anexo II – Tabela A1). Ao contrário da maioria dos termoplásticos, o policarbonato pode sofrer grandes deformações plásticas sem fraturar, contudo apresenta um comportamento rígido à temperatura ambiente [28].

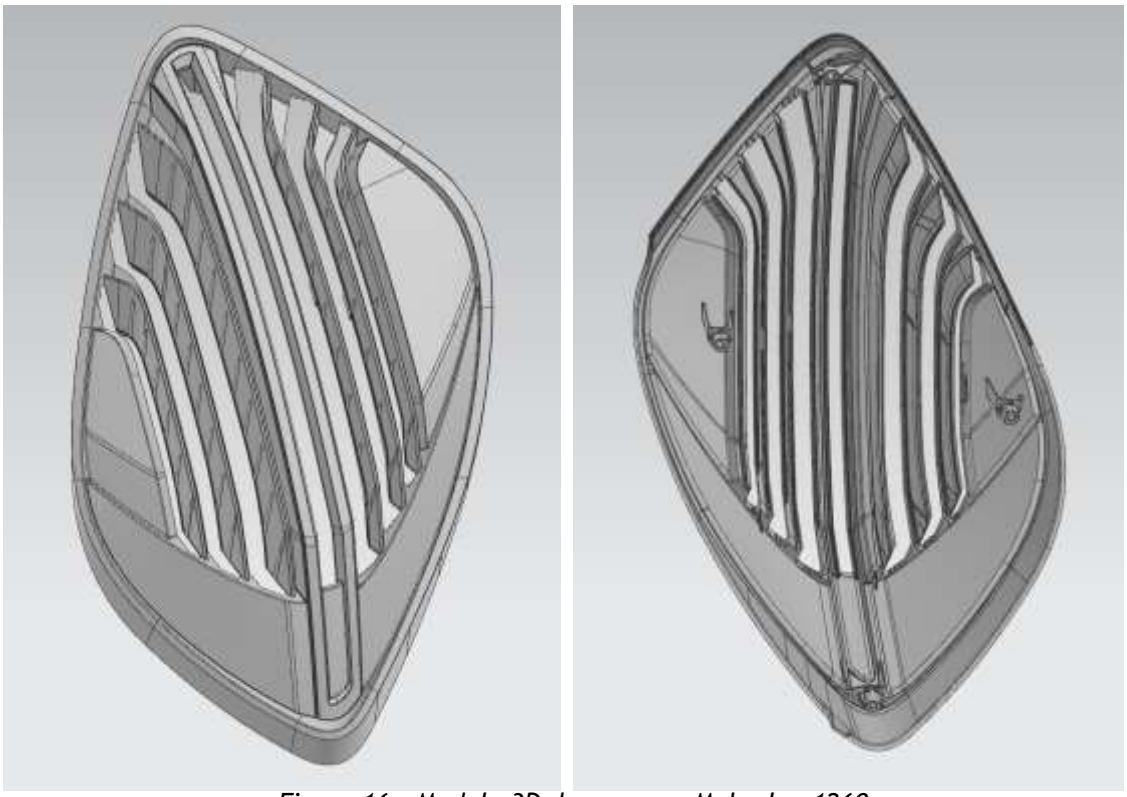


Figura 16 – Modelo 3D da peça em Makrolon 1260.

3.2.2.Postiço de gravação do macho: Aço 2738 HH

O postiço de gravação está representado na Figura 17 com a cor azul, representando assim, a zona onde o material injetado entra em contacto com o molde. Nessa zona é necessário que o material apresente caraterísticas específicas que promovam a qualidade das peças durante a injeção e a durabilidade desta ferramenta.

Este material é utilizado no macho sendo caraterizado como um aço ferramenta ligado para trabalho a frio ou a quente, sendo possível fazer tratamento térmico adicional de nitruração que promove a resistência ao desgaste e à oxidação (Figura 17). Dentro dos aços da família P20, o aço 2738 é o mais adequado para os moldes de injeção de plástico, pois a adição de Ni promove uma dureza homogénea e a redução de segregações (Anexo II – Tabela A2.1). As principais aplicações são para a produção de moldes para injeção plástica e sopro, com requisitos elevados de resistência ao desgaste e fadiga, ideal para séries de produção média, com ótimas propriedades de soldabilidade e maquinabilidade (Anexo II – Tabela A2). O tratamento térmico para este aço consiste num revenido entre 200 a 650 ºC,

seguido de um arrefecimento utilizando azoto para obtenção de uma dureza entre 28 a 50 HRC (Anexo II – Tabela A2.2) [29].

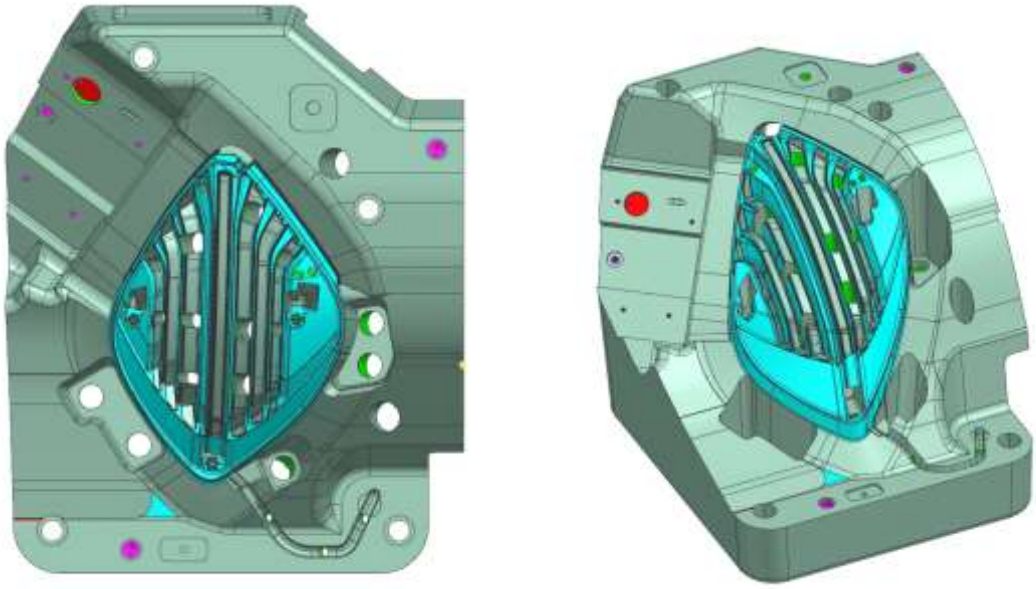


Figura 17 – Postiço de gravação do macho em aço 2738 HH.

3.2.3.Postiço de gravação da cavidade: Aço 2343 ESR

O postiço de gravação está representado na Figura 18 com a cor azul, representando assim, a zona onde o material injetado entra em contacto com o molde. Nessa zona é necessário que o material apresente caraterísticas específicas que promovam a qualidade das peças durante a injeção e a durabilidade desta ferramenta.

Este material é utilizado na cavidade sendo caraterizado como um aço ferramenta 2343 (AISI H11) para trabalho a quente ligado ao crómio, molibdénio e vanádio, demonstra razoável condutividade térmica, boa resistência à fluência, tenacidade e ductilidade, bem como alta temperabilidade aliada com boa maquinabilidade e polimento (Anexo II – Tabela A3) (Figura 18). A sigla ERS refere-se ao processo de eletro-refusão por escória na qual significa que este aço extra limpo é refinado com o objetivo de obter uma microestrutura de grão mais fina atingindo valores muito elevados de resistência, tenacidade e resistência à fadiga térmica (Anexo II – Tabela A3.1). Este aço é ideal para a longevidade dos moldes, pois permite tempos de vida mais longos. As principais aplicações tendo em conta as caraterísticas deste material incluem placas e cavidades de moldação e insertos para moldes de injeção plástico que exijam alta

resistência à fissuração a quente, sendo possível fazer tratamentos térmicos adicionais para alívio de tensões e aumento da resistência ao desgaste. Este material também é ideal para ferramentas de extrusão, mandris, punções e lâminas de corte circular [30, 31].

Ciclo térmico:

1º Recozimento de amaciamento: 750 a 800 ºC cerca de 4 a 5 horas;

Arrefecimento: Controlado dentro do forno, 10 a 20 ºC por hora até cerca de 600 ºC. Arrefecimento posterior em ar, obtendo uma dureza no máximo 205 HB;

2º Recozimento de alívio de tensões: é recomendado tratamento térmico a 550 ºC;

3º Nitruração: Um tratamento a 525 °C em gás amoníaco resulta numa dureza superficial de aproximadamente 55 HRC, o que resulta num aumento da resistência ao desgaste e impedimento a colagem do material fundido às paredes do molde [30, 31].

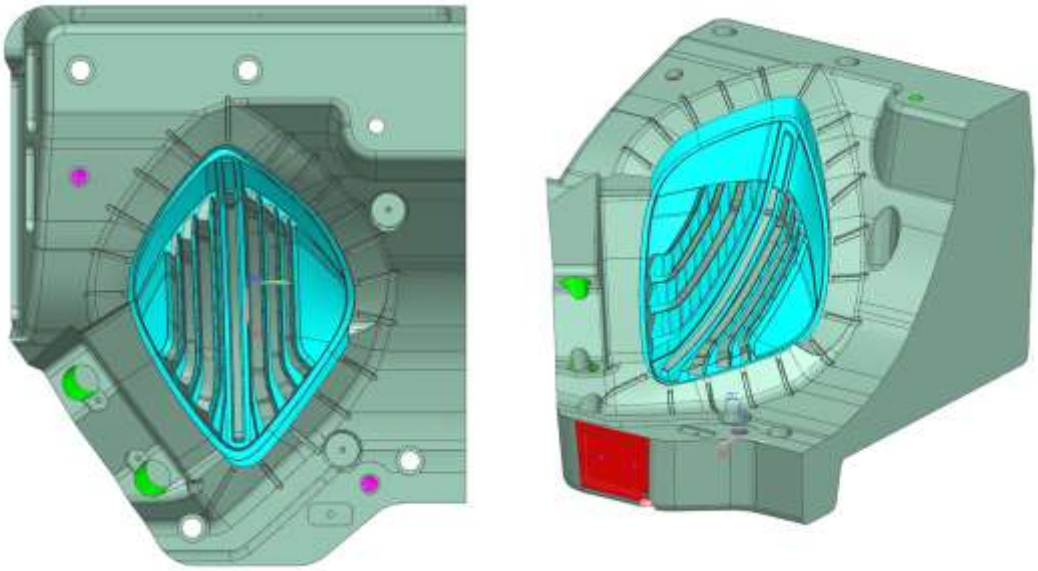


Figura 18 – Postiço de gravação da cavidade em aço 2343 ESR.

3.2.4.Materiais para fabrico aditivo: Aço Ferramenta 1.2709

O aço ferramenta 1.2709, denominado como *Maraging Steel MS1* é um aço endurecido por envelhecimento que apresenta uma constituição maioritariamente martensítica derivado do nome. Este material após tratamento pode atingir uma dureza de 54 HRC, apresenta outras características que fazem com que este seja ideal para a produção dos moldes. Este possui alta resistência mecânica, dureza, tenacidade e maquinabilidade, como também boa condutividade térmica, excelente resistência à fadiga e propriedades ajustáveis com diferentes tratamentos térmicos (Anexo II – Tabela A4). O aço devido às suas características é utilizado na produção das cavidades e machos por fabrico aditivo, com o tamanho genérico das partículas do pó metálico entre 20 a 65 µm (Anexo II – Tabela A4.1). Este tipo ferramentas exigem ultra alta resistência para aplicações de moldação exigentes como por exemplo, moldação por injeção plástica, ferramentas de extrusão, ferramentas de prensagem a quente e ferramentas de fundição sob pressão para alumínio e ligas de zinco [32].

Tratamento térmico:

A primeira etapa é o recozimento que tem como objetivo minimizar a quantidade de austenite na matriz martensítica. A dureza necessária é obtida através do tratamento de envelhecimento, onde o endurecimento ocorre através da formação de fases intermetálicas e precipitados. O recozimento é realizado durante 2 h a 940 °C (±10 °C), seguido de um arrefecimento rápido ao ar até à temperatura ambiente (abaixo de 32 °C). Normalmente, a taxa de arrefecimento é entre 10 a 60 °C/min. Antes de iniciar o tratamento de envelhecimento para alcançar a microestrutura desejada é necessário atingir a temperatura ambiente.

O envelhecimento é realizado durante 3 a 6 h a 510 °C (±10 °C) para atingir um máximo de dureza, seguido de um arrefecimento ao ar. Para peças de grandes dimensões é necessário assegurar um aumento do tempo de estágio até 6 h para obter propriedades uniformes. Além disso, para maximizar a resistência à fadiga, recomenda-se um tempo de estágio de 6 h [32].

4.Resultados e Discussão

Neste módulo, vamos apresentar e discutir os resultados obtidos pelas simulações reológicas, a partir dos canais conformados criados anteriormente. Para caraterizar um sistema de arrefecimento eficiente é necessário comparar e ter em conta os parâmetros essenciais que o caraterizam sendo estes, a temperatura do molde e da peça, o seu respetivo empeno e a temperaturas de entrada e saída dos canais de arrefecimento. As análises seguintes vão ter em consideração o sistema convencional com um tempo de arrefecimento de 17,8 segundos e o sistema conformado com diferentes tempos de arrefecimento 13,8 e 10,8 segundos.

4.1.Apresentação dos resultados

Análise em relação às diferentes geometrias dos sistemas de arrefecimento

O molde com o sistema convencional foi desenvolvido pela empresa *Azemoldes*, na qual, não foi alterado nenhum tipo de geometria ao longo de todo o trabalho (Figura 19). A geometria destes canais estão muito bem implementadas, denotando-se um grande trabalho por parte dos projetistas de moldes da empresa. Estes conseguiram com que os canais convencionais quase que acompanham perfeitamente a geometria da peça. Isto obriga a que o molde se torne complexo, apresentando inúmeras furações, insertos, *sliders* e extratores.

No entanto, o sistema conformado desenvolvido ao longo deste estágio (Figura 19) cumpriu todos os requisitos necessários para implementar este sistema com sucesso, apesar de existirem algumas limitações. Como a aplicação *Siemens NX* possui comandos específicos de *Conformal Cooling* introduzidos na última versão, a criação e o desenvolvimento destes canais estão num estado muito embrionário, não sendo possível alterar a geometria da secção dos mesmos. Contudo, a falta de experiência na aplicação e em projeto de moldes tem influência na qualidade dos canais desenvolvidos.

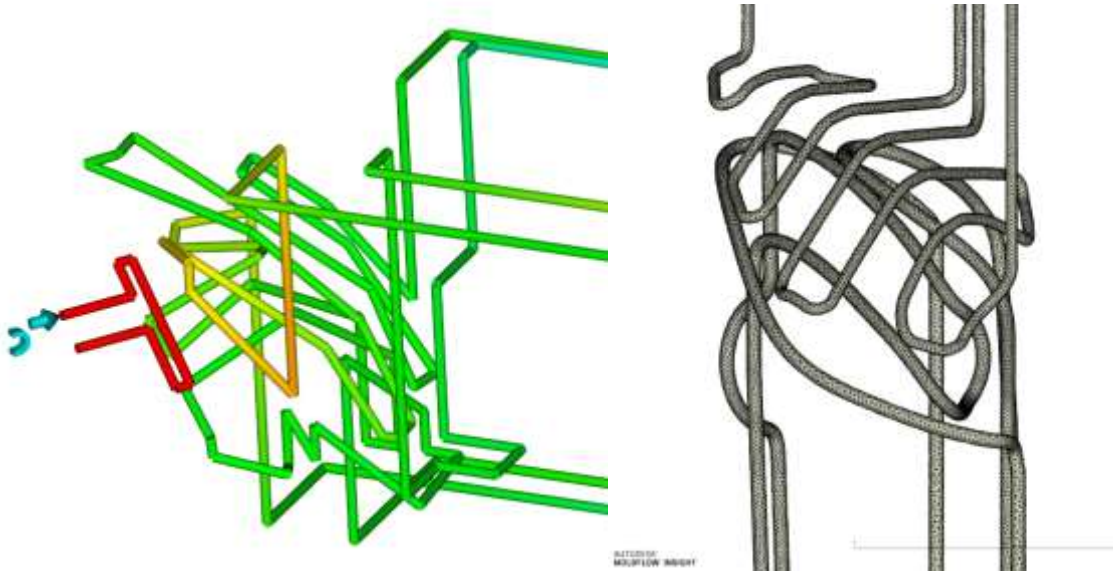


Figura 19 – Geometria dos canais no sistema. Convencional à esquerda e conformado à direita.

Como a peça apresenta uma espessura entre 2 a 4 mm é indicado usar canais de 10 a 12 mm de diâmetro no método convencional. Como tal, os canais implementados no molde são de 11 mm, por isso este terá que cumprir uma distância entre os canais de 25 mm (2,5d) e entre os canais e a cavidade de 20 mm (0,8D).

No método conformado, consoante a espessura da peça a injetar, que neste caso situa-se entre 2 a 4 mm, é indicado usar canais de 8 a 12 mm de diâmetro. Por isso, optou-se por escolher um diâmetro de 8 mm na cavidade e 10 mm no macho, os qual terão que cumprir respetivamente uma distância entre os canais de 16 mm e 19 mm (2d) e entre os canais e a cavidade de 12 mm e 15 mm (1.5d). A presença de elementos como extratores e *sliders* reduzem o espaço de desenho destes canais tendo em conta o cumprimento das distâncias mencionadas anteriormente. Isto faz com que normalmente a geometria destes canais seja complexa e que a distância uniforme destes à peça, nem sempre seja possível.

Análise em relação às áreas de acumulação de calor

Os pontos quentes da peça que representam as zonas de acumulação de calor estão diretamente relacionados com a falta ou a fraca passagem de canais de arrefecimento por essa zona. Este parâmetro reflete-se também em zonas quentes no molde, ou seja, temperatura do molde (Figura 20). Ao comparar os resultados destes dois sistemas, convencional e conformado vemos que o calor

extraído através dos canais vai reduzir a quantidade de pontos quentes e o seu pico de temperatura, consequentemente encurta o tempo de ciclo.

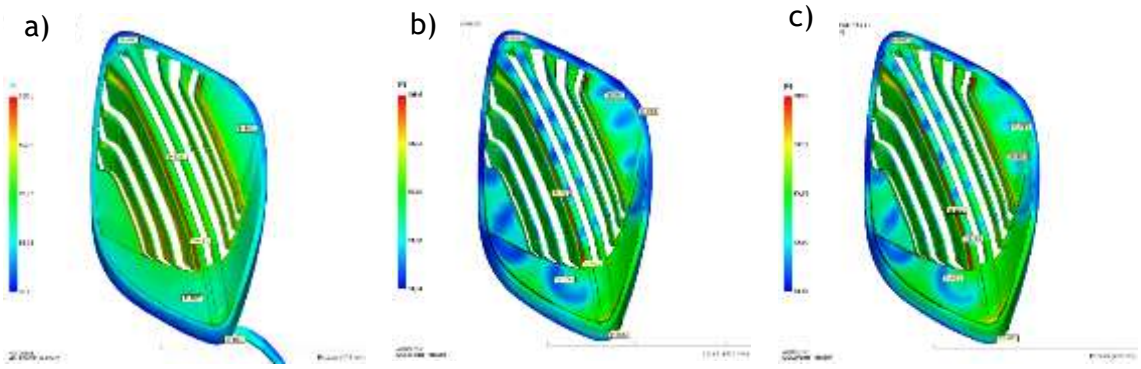


Figura 20 - Temperatura média da peça e da superfície da cavidade do molde nos registos dos ensaios. a) Sistema convencional b) Sistema conformado com tempo de arrefecimento de 13,8 e c) 10,8 segundos.

A acumulação de calor presente na peça, na qual está implementado o sistema convencional ajuda a decidir onde dar mais ênfase no sistema de arrefecimento conformado. Normalmente, esta acumulação de calor ocorre devido ao material ter uma espessura maior nessa zona, ou geometrias não favoráveis à extração de calor. Contudo, a proximidade dos canais à peça por causa do sistema conformado torna-se uma grande vantagem para a eliminação da acumulação de calor.

Análise das temperaturas de entrada e saída dos canais de refrigeração

Outro parâmetro para ter em consideração é a temperatura de entrada e saída dos canais, quando o líquido de arrefecimento entra a 80 ºC e sai do sistema a uma temperatura muito próxima da entrada significa que este sistema apresenta uma boa eficiência.

Através das imagens conseguimos observar que ao longo dos percursos existem zonas com mais temperatura nos canais de arrefecimento, na qual é necessário reforçar essa zona através do aumento da área de contacto dos canais com a peça (Figura 21). Sendo possível a alteração da geometria de secção para aumentar essa área de contacto e consequentemente as trocas de

calor. Contudo, estas zonas quentes aumentam a diferença de temperaturas entre a entrada e saída promovendo um sistema menos eficiente.

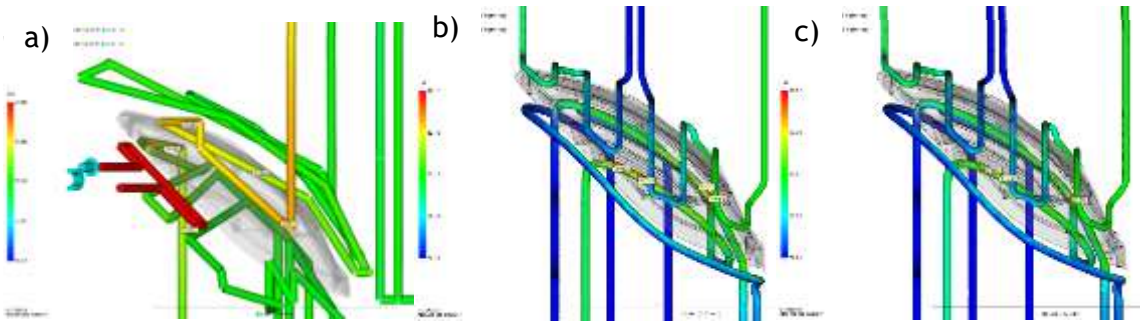


Figura 21 – Acumulações de calor nos circuitos de arrefecimento. a) Sistema convencional b) Sistema conformado com tempo de arrefecimento de 13,8 e c) 10,8 segundos.

O sistema convencional apresentou diferenças de temperatura de entrada e saída em média de -3,3 ºC no entanto, o sistema conformado apresentou diferenças de temperatura de entrada e saída em média de 0,98 ºC e 0,86 ºC, nos diferentes tempos de arrefecimento, como podemos ver pelos resultados dos ensaios reológicos (Tabela 5). Isto significa que o fundido esteve a ser arrefecido com eficiência extraindo calor suficiente e assim não provocou um aumento da temperatura dos canais (Figura 22).

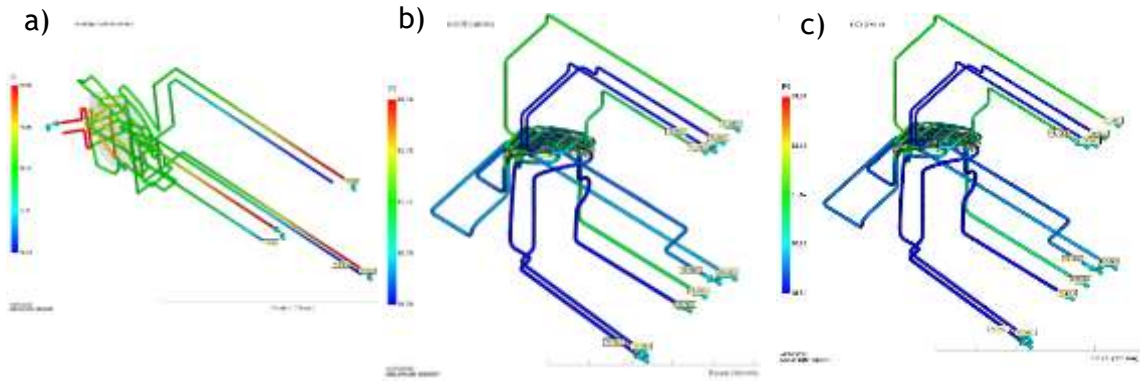


Figura 22 - Temperatura dos canais. a) Sistema convencional b) Sistema conformado com tempo de arrefecimento de 13,8 e c) 10,8 segundos.

A baixa variação de temperatura entre a entrada e saída significa que o fundido está a ser arrefecido com eficiência, caso contrário o calor gerado pelo fundido e a temperatura do molde provocam um aumento da temperatura do fluído de arrefecimento. Com a temperatura do fluído a 80 ºC teremos uma referência na qual qualquer desvio desse valor de temperatura é prejudicial para a eficiência do sistema.

Tabela 5 – Valores da temperatura de saída e entrada dos canais com a respetiva variação

Temperatura de saída – entrada (ºC)	Variação da temperatura do fluido (ºC)
Canais Convencionais	
77,1 - 80,0	-2,9
76,4 – 80,0	-3,6
76,5 – 80,0	-3,5
79,7 – 80,0	-0,3
Canais Conformados – 13,8 s	
78,9 – 82,2	1,1
78,6 – 83,7	1,2
78,1 – 83,0	0,6
78,1 – 81,7	0,5
78,7 – 83,3	1,5
Canais Conformados – 10,8 s	
78,9 – 82,1	1,1
78,7 – 83,1	0,9
78,2 – 82,4	0,5
78,3 – 81,4	0,4
78,8 – 83,2	1,4

Análise da deformação da peça

A quantidade de deformação provocada pelo arrefecimento vai estar associada com o aparecimento de defeitos. Para diminuir os empenos é necessário obter um arrefecimento rápido e homogêneo o que irá resultar numa maior precisão dimensional do processo. Este parâmetro está diretamente relacionado com o arrefecimento. No entanto, a peça com deformação só é rejeitada caso esse valor de empeno esteja fora dos requisitos estabelecidos previamente. Esta análise focou-se na deformação da peça no seu global e na componente Z (Figuras 23 e 24). Caso exista um arrefecimento heterogéneo provocado pelo sistema de arrefecimento, este defeito pode ser agravado devido à existência de temperaturas mais elevadas em certas zonas da peça. Um arrefecimento mais lento poderá ajudar a contrariar este tipo de defeito.

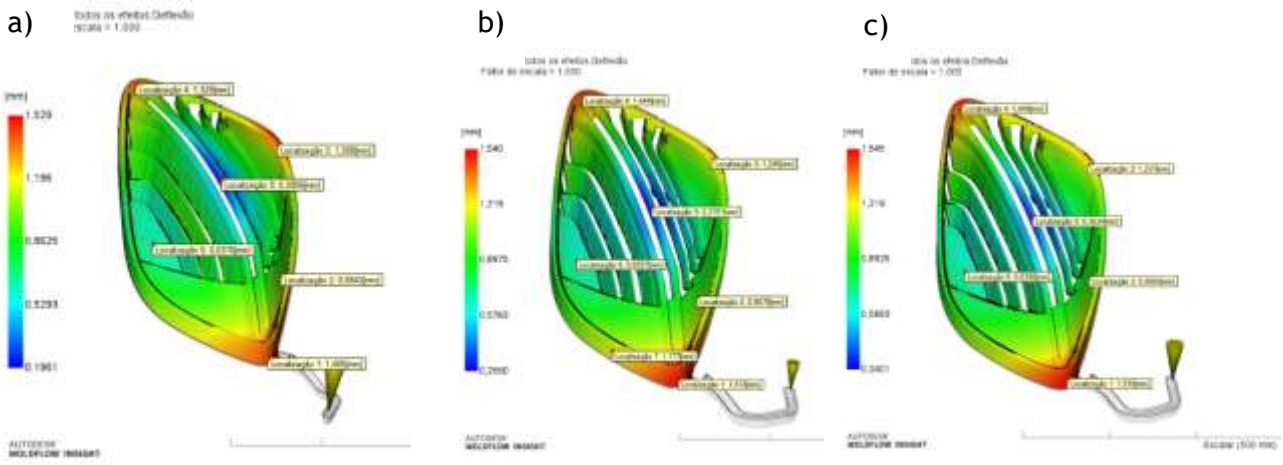


Figura 23 - Empeno Global no sistema a) convencional b) conformado com tempo de arrefecimento 13,8 segundos e c) conformado com tempo de ciclo 10,8 segundos.

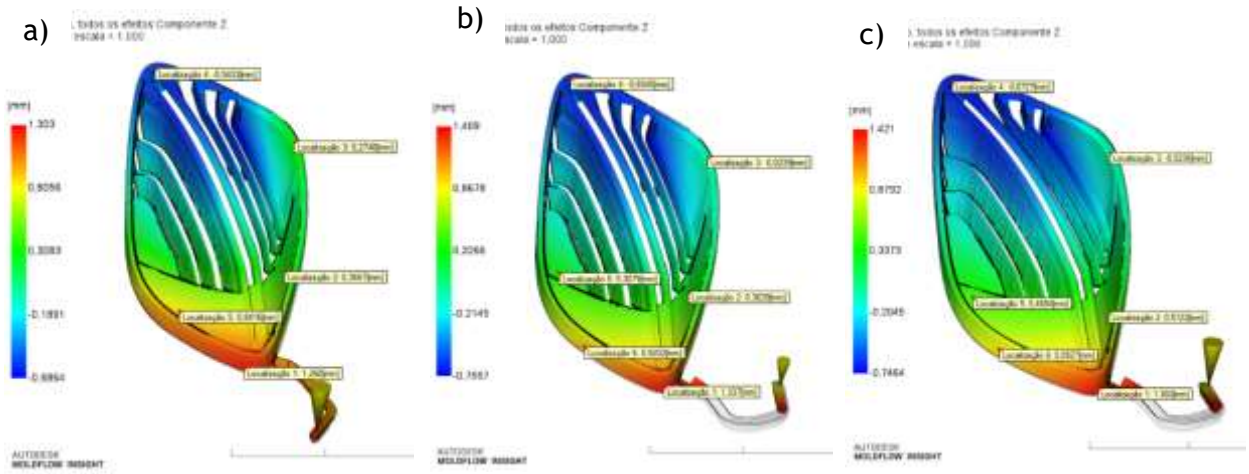


Figura 24 - Empeno Componente Z no sistema a) convencional b) conformado com tempo de arrefecimento 13,8 segundos e c) conformado com tempo de ciclo 10,8 segundos.

Através das imagens (Figuras 23 e 24) denotou-se que há um ligeiro aumento em termos de deformação global e na componente Z quando se implementa este sistema conformado nos diferentes tempos da etapa de arrefecimento.

Por fim, o tempo de arrefecimento vai afetar diretamente o tempo de ciclo uma vez que os outros tempos das etapas do ciclo vão se manter fixos por propósito de estudo. Este parâmetro varia consoante o sistema de arrefecimento, caso este seja uniforme e homogéneo, o tempo de

arrefecimento vai reduzir, proporcionando um sistema mais eficiente e economicamente benéfico para a implementação.

Análise do efeito das marcas de contração

As marcas de contração são defeitos visuais na superfície da peça que refletem a sua qualidade superficial. As marcas de contração são causadas por um diferencial na retração volumétrica. Ocorrem tipicamente nos lados opostos das superfícies onde estão as grelhas, e em áreas significativamente mais espessas das peças, onde a retração volumétrica não é adequadamente compensada durante a fase de compactação.

Na análise destes defeitos na aplicação, valores superiores a 0,03 mm, normalmente são marcas visíveis a olho nu (Figura 25).

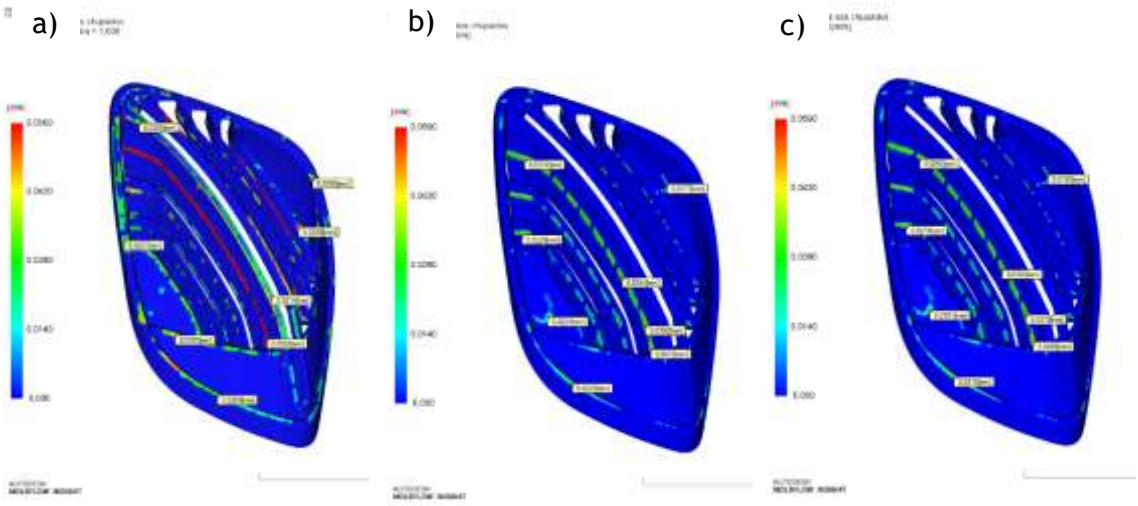


Figura 25 – Marcas de contrações nos dois sistemas a) convencional b) conformado com tempo de arrefecimento de 13,8 segundos e c) 10,8 segundos.

Este defeito sob a forma de depressão na superfície pode-se agravar devido a um arrefecimento heterogéneo. Este pode ser compensado com a alteração da geometria da cavidade moldante e agravado pelas temperaturas elevadas do fundido. Através da imagem (Figura 25) denotou-se que houve uma redução em termos de marcas de contração, sem que se altere a geometria do produto, quando se implementou este sistema conformado de arrefecimento.

4.2.Discussão de resultados

Os estudos reológicos consumiram muito tempo devido ao facto de consumirem muito poder computacional. Inicialmente, a aplicação assumia falhas durante a importação de ficheiros (.IGES) devido às Splines criadas na aplicação da Siemens NX apresentarem um grau muito elevado de complexidade. Isto obriga à simplificação das linhas e posterior exportação. De seguida, na etapa de malhamento, esta apresentou inúmeros problemas sendo que os canais não seguiam a geometria criada anteriormente arqueando de forma excessiva, alterando a direção e consequentemente deformando os canais criados. Após malhar a geometria da peça este processo criava uma esfera à volta do componente o que se refletiu numa estrutura inusável. Finalmente, após ultrapassagem destas dificuldades, com a ajuda da equipa técnica da CADFlow, surgiram outros problemas na configuração das simulações de arrefecimento conformado devido à versão da aplicação. Deste modo, foi necessário pedir ajuda técnica da Autodesk para configurar o ensaio na versão 2019 do Moldflow e importar posteriormente para versão 2021 para conseguir obter resultados. Após isto, conseguiu-se a alteração dos parâmetros desejados para os vários ensaios demonstrados de seguida. No entanto, o tempo era escasso para realizar uma nova iteração dos canais de arrefecimento e respetivos ensaios reológicos.

1º Ensaio Reológico: Comparação dos dois sistemas com a mesma duração da etapa de arrefecimento.

Na preparação do ensaio reológico utilizaram-se os parâmetros não variáveis já predefinidos na análise convencional (ensaio padrão) na qual se analisou e discutiu os resultados perante as condições impostas.

Tabela 6 - Comparação dos dois sistemas com a mesma duração da etapa de arrefecimento

	Convencional	Conformado
Tempo de ciclo	30 s	30 s
Redução do tempo de arrefecimento	0 s	0 s
Tempo de arrefecimento	17,8 s	17,8 s
Temperatura média da superfície da peça	99,85 ºC	92,85 ºC
Temperatura máxima da superfície da peça	135,29 ºC	126,82 ºC
Temperatura média da superfície da cavidade	94,85 ºC	91,85 ºC

Empeno componente Z	[-0,6864; 1,303] mm	[-0,7409; 1,393] mm
Empeno global	[0,1961; 1,529] mm	[0,2380; 1,525] mm

A Tabela 6 monstra os resultados de forma resumida, a partir do estudo reológico na qual pode-se observar que no sistema de arrefecimento conformado obtêm-se valores mais reduzidos na temperatura da peça e cavidade, no entanto, o empeno apresenta valores relativamente semelhantes. Estes valores de empeno podem ser críticos dependendo dos requisitos que se pretenda para este tipo de peças, como não é um componente estrutural, os requisitos podem ser menos exigentes.

2º Ensaio Reológico: Comparação dos dois sistemas com redução do tempo da etapa de arrefecimento até igualar a temperatura da superfície da cavidade.

Novamente os ensaios foram executados através da definição de parâmetros não variáveis já predefinidos com o intuito de obter resultados com as novas condições implementadas, neste caso a redução do tempo de ciclo.

Normalmente existe uma regra que diz que é possível variar 2ºC na temperatura do molde por cada segundo a menos no tempo de ciclo. Assim, consegue-se inserir na aplicação o tempo de ciclo para que a temperatura da superfície da cavidade seja idêntica ao estudo convencional.

Tabela 7 - Comparação dos dois sistemas com redução de 7 segundos na etapa de arrefecimento

	Convencional	Conformado
Tempo de ciclo	30 s	23 s
Redução do tempo de arrefecimento	0 s	7 s
Tempo de arrefecimento	17,8 s	10,8 s
Temperatura média da superfície da peça	99,85 ºC	95,85 ºC
Temperatura máxima da superfície da peça	135,29 ºC	137,38 ºC
Temperatura média da superfície da cavidade	94,85 ºC	94,85 ºC
Empeno componente Z	[-0,6864; 1,303] mm	[-0,7464; 1,421] mm
Empeno global	[0,1961; 1,529] mm	[0,2401; 1,545] mm

A Tabela 7 monstra os resultados de forma resumida, a partir do estudo reológico na qual pode-se observar que no sistema de arrefecimento conformado obtêm-se valores mais reduzidos na temperatura da peça e a

mesma temperatura da superfície da cavidade, no entanto, o empeno tem um ligeiro aumento. Caso estes valores de empeno sejam críticos pode-se fazer um novo ensaio com um tempo de arrefecimento intermédio. Este tem como intuito perceber se é possível chegar a um equilíbrio entre um empeno mais reduzido, mas também um tempo de ciclo menor que os iniciais 30 segundos.

3º Ensaio Reológico: Comparação dos dois sistemas com um tempo da etapa de arrefecimento que não comprometa em demasia o empeno com a redução da temperatura da peça e do tempo de arrefecimento.

Mais uma vez estes ensaios foram elaborados através da definição de parâmetros não variáveis predefinidos com o intuito de obter resultados com novas condições implementadas, neste caso um tempo de ciclo intermédio.

Tabela 8 - Comparação dos dois sistemas com redução de 4 segundos na etapa de arrefecimento

	Convencional	Conformado
Tempo de ciclo	30 s	26 s
Redução do tempo de arrefecimento	0 s	4 s
Tempo de arrefecimento	17,8 s	13,8 s
Temperatura média da superfície da peça	99,85 ºC	94,85 ºC
Temperatura máxima da superfície da peça	135,29 ºC	132,41 ºC
Temperatura média da superfície da cavidade	94,85 ºC	93,85 ºC
Empeno componente Z	[-0,6864; 1,303] mm	[-0,7557; 1,409] mm
Empeno global	[0,1961; 1,529] mm	[0,2550; 1,540] mm

Através da análise destes resultados denotou-se que o empeno tem uma variação muito pequena entre os diferentes ciclos, sendo o arrefecimento o fator com menos impacto para o empeno da peça (Tabela 8). Outros fatores preponderantes como contrações volumétricas podem ser mais impactantes. Este fator relaciona-se com a baixa pressão de injeção e compactação, alta temperatura de fusão e do molde e o curto tempo de compactação. Assim, estes vão ter mais impacto no empeno do que o tempo de arrefecimento. Para melhorar o empeno segundo esta relação de fatores poderia ser benéfico a alteração do ponto de injeção, alteração da pressão de injeção ou a modificação da temperatura do fundido pois são os fatores mais comuns no ajuste dos parâmetros do processo.

Assim, conseguimos selecionar a etapa de arrefecimento mais favorável sendo esta a de 10,8 segundos com menos 7 segundos do tempo original, pois as diferenças de valores de empeno não são significativamente elevados ao ponto de se justificar a escolha da etapa de arrefecimento de 13,8 segundos.

Para os ensaios reológicos convencionais utilizou-se elementos de malha menos complexos e o *solver Cool* para a obtenção dos resultados. Isto poderá refletir-se numa precisão e variação de resultados diferentes em relação ao ensaio reológico conformado. Este utilizou elementos de malha com maior complexidade, sendo que o *solver Cool FEM* utilizado é mais apropriado para os estudos de arrefecimento conformados que criam uma nova malha por cima dos elementos. Mais uma vez, isto poderá refletir na pequena variação dos resultados obtidos no empeno e na temperatura dos fluídos, entre outros.

4.3.Análise e Discussão de custos

A análise de custos seguinte tem o propósito de comparar os diferentes sistemas em termos económicos, no entanto, iremos ter em consideração o sistema convencional (sistema padrão), o sistema conformado de 10,8 segundos e o sistema conformado de 13,8 segundos, na qual foram estudados anteriormente.

4.3.1.Método convencional

A produção prevista para este molde é de 750.000 peças, sendo este de multi cavidade (2 cavidades), apresentando um tempo de ciclo de 35 segundos. Com esta informação, foi possível calcular o tempo de funcionamento da máquina de injeção, 3.646 horas, correspondendo a 13.125.000 segundos.

$$Tf = \frac{Np * Tc}{Nc}$$

Tf = tempo de funcionamento da máquina de injeção

Np = número de peças previstas para produção

Tc = tempo de ciclo do processo de injeção

Nc = número de cavidades presentes no molde

A máquina na qual vai injetar o fundido apresenta uma tonelagem de 900T, com isto o preço por hora da máquina corresponde a 90 € por hora. Assim, o custo para produzir 750.000 peças com a respetiva máquina de injeção é de 328.140 €.

$$Cp = Tf * Ph$$

Cp = Custo para produzir 750.000 peças

Tf = Tempo de funcionamento da máquina de injeção

Ph = Preço da máquina de injeção por hora

Tabela 9 - Cotação simplificada dos elementos moldantes produzidos pelo processo convencional

Processos	Zonas de moldação	Tempo (h)	Custo (€)
Fresagem	Cavidade	202 h 37 min	8.105 €
	Macho	150 h 11 min	6.007 €
	Total	352 h 48 min	14.112 €
Erosão	Cavidade	1 h 05 min	35 €
	Macho	3 h 49 min	122 €
	Total	4 h 54 min	157 €
Eletro erosão	Cavidade	-	648 €
	Macho	-	481 €
	Total	-	1.129€
Furação	Cavidade	101 h 18 min	2.330 €
	Macho	75 h 06 min	1.727 €
	Total	176 h 24 min	4.057 €
Torno	Cavidade	-	567 €
	Macho	-	421 €
	Total	-	988 €
Retificação	Cavidade	-	1.544 €
	Macho	-	1.544 €
	Total	-	3.088 €
Elétrodos		-	11.598€
Maquinação:	Cavidade	305 h	13.229 €
(Todas as etapas	Macho	229 h 06 min	10.302 €
anteriores)	Total	534 h 06 min	35.129 €

Material	Cavidade	-	10.320 €
	Macho	-	3.443 €
	Total	-	13.794 €
Tratamento térmico	Cavidade	-	4.014 €
	Macho	-	0 €
	Total	-	4.014 €
Polimento	Cavidade	56 h 59 min	1.368 €
	Macho	40 h 43 min	977 €
	Total	97 h 42 min	2.345 €
TOTAL	Cavidade	361 h 59 min	28.931 €
	Macho	269 h 49 min	14.722 €
	Total	631 h 48 min	43.653 €
TOTAL	TOTAL	631 h 48 min	55.251 €

O custo e tempo dos elementos moldantes são 55.251€ e 631h 48min, respetivamente.

Por fim, o custo total de produção dos elementos moldantes e das peças que o molde tem previsto para produzir representa o valor de 383.391 €.

Todos os valores presentes na tabela 9 são adaptados a partir dos resultados obtidos pela aplicação *QuickQuote*. Os ficheiros completos produzidos por este programa podem ser consultados no Anexo III.

4.3.2.Método conformado

A produção prevista para este molde é de 750.000 peças, sendo este de multi cavidade, duas cavidades, apresentando um tempo de ciclo de 28 segundos. Com esta informação, foi possível calcular o tempo de funcionamento da máquina de injeção, 2.917 horas, correspondendo a 10.500.000 segundos.

$$Tf = \frac{Np * Tc}{Nc}$$

Tf = tempo de funcionamento da máquina de injeção

Np = número de peças previstas para produção

Tc = tempo de ciclo do processo de injeção

Nc = número de cavidades presentes no molde

A máquina na qual vai injetar o fundido apresenta uma tonelagem de 900T, com isto o preço por hora da máquina corresponde a 90 € por hora. Assim, o custo para produzir 750.000 peças com a respetiva máquina de injeção é de 262.530€.

$$Cp = Tf * Ph$$

Cp = Custo para produzir 750.000 peças

Tf = Tempo de funcionamento da máquina de injeção

Ph = Preço da máquina de injeção por hora

Tabela 10 – Cotação simplificada dos elementos moldantes produzidos pelo processo aditivo

Processos	Zonas de moldação	Tempo (h)	Custo (€)
Impressão	Cavidade	528 h	9.990 €
	Macho	769 h 08 min	13.190 €
	Total	1297 h 08 min	23.180 €
Material	Cavidade	-	3.444 €
	Macho	-	4.450 €
	Total	-	7.894 €
Total impressão	Cavidade	528 h	13.400 €
	Macho	769 h 08 min	17.640 €
	Total	1297 h 08 min	31.040 €
Maquinação	Cavidade	305 h	13.229 €
	Macho	229 h 06 min	10.302 €
	Total	534 h 06 min	35.129 €
Tratamento térmico	Cavidade	-	220 €
	Macho	-	220 €
	Total	-	440 €
Polimento	Cavidade	56 h 59 min	1.368 €
	Macho	40 h 43 min	977 €
	Total	97 h 42 min	2.345 €
Elétrodos		-	11.598 €
TOTAL	Cavidade	889 h 59 min	28.217 €
	Macho	1.038 h 57 min	29.139 €

	Total	1928 h 56 min	68.954 €

O custo e tempo dos elementos moldantes são 68.954€ e 1928h 56min, respetivamente.

Por fim, o custo total de produção dos elementos moldantes e das peças que o molde tem previsto para produzir representa o valor de 331.484 €.

Os valores de impressão, matéria-prima e tratamento térmico para o fabrico aditivo são obtidos através da ajuda da instituição *Centimfe*, simulando assim o fabrico aditivo através da impressora de SLM, modelo *Trumph 3500* (Tabela 10). Os valores de maquinação presentes na Tabela 9 são adaptados a partir dos resultados obtidos previamente pela aplicação *QuickQuote* devido a este molde apresentar uma tecnologia híbrida.

A redução do tempo de ciclo de 7 segundos reflete-se num ganho 51.907€. O custo dos elementos moldantes que inicialmente apresentava uma diferença de 13. 703 € entre os dois métodos é amortizado no valor do ganho (Tabela 11).

Tabela 11 - Comparação entre os dois métodos de fabrico, convencional e aditivo

	Método Fabrico Convencional	Método Fabrico Aditivo
Tempo de ciclo (s)	35	28
Tempo de construção das zonas moldantes (h)	631	1928
Custo da construção das zonas moldantes (€)	55.251	68.954
Custo da produção de 750.000 peças (€)	383.391	331.484
Ganho na produção (€)	51.907	

O ganho obtido surge a partir das otimizações do sistema de arrefecimento implementadas no projeto do molde, sendo que a redução do tempo de arrefecimento reflete-se na otimização do sistema.

4.3.3.Discussão de custo

Para a análise seguinte vai-se considerar o sistema convencional, o sistema conformado com um tempo de arrefecimento de 10,8 segundos e um tempo de arrefecimento de 13,8 segundos. O objetivo é o estudo do custo benefício para as duas situações.

Para construir os gráficos (Figuras 26 e 27) com tempos de arrefecimento de 10,8 segundos e de 13,8 segundos usou-se o Excel para calcular os valores para as diferentes situações. Assim, juntou-se as duas fórmulas para calcular de forma direta o custo total de produção para o diferente número de peças.

Fórmula para calcular o tempo de fabrico:

$$Tf = \frac{Np * Tc}{Nc}$$

Conversão do tempo de fabrico de segundos para horas:

$$Tf = \frac{\frac{Np * Tc}{Nc}}{3600}$$

Fórmula para o custo de produção das peças:

$$Cp = Tf * Ph$$

Substituição do tempo de fabrico na fórmula do custo de produção:

$$Cp = \left(\frac{\left(\frac{Np * Tc}{Nc}\right)}{3600}\right) * Ph$$

Fórmula do custo de produção mais o custo do molde resultante da fórmula do custo total de produção:

$$Cp = \left(\frac{\left(\frac{Np * Tc}{Nc}\right)}{3600}\right) * Ph + Cm$$

Cp = Custo para produzir 750.000 peças

Np = número de peças previstas para produção

Tc = tempo de ciclo do processo de injeção

Nc = número de cavidades presentes no molde

Ph = Preço da máquina de injeção por hora

Cm = custo dos elementos moldantes

Desta forma, foi possível obter as seguintes tabelas (Tabelas 12, 13 e 14) para comparar os dois processos quando existe uma redução de 7 segundos na etapa de arrefecimento:

Tabela 12 - Custo total de produção pelo método convencional para um arrefecimento de 17,8 segundos

Método Convencional - Arrefecimento de 17,8 segundos	
Número de peças previstas para produção	Custo total de produção (€)
0	55.251
250.000	164.626
500.000	274.001
750.000	383.376
1.000.000	492.751

Tabela 13- Custo total de produção pelo método de fabrico aditivo para um arrefecimento de 10,8 segundos

Método Fabrico Aditivo - Arrefecimento de 10,8 segundos	
Número de peças previstas para produção	Custo total de produção (€)
0	68.954
250.000	156.454
500.000	243.954
750.000	331.454
1.000.000	418.954

Tabela 14 - Ganhos entre os dois processos convencional e fabrico aditivo para uma redução de 7 segundos

Ganhos entre os dois processos - Redução de 7 segundos	
Número de peças previstas para produção	Ganho total de produção (€)
0	-13.703
250.000	08.172
500.000	30.047
750.000	51.922
1.000.000	73.797

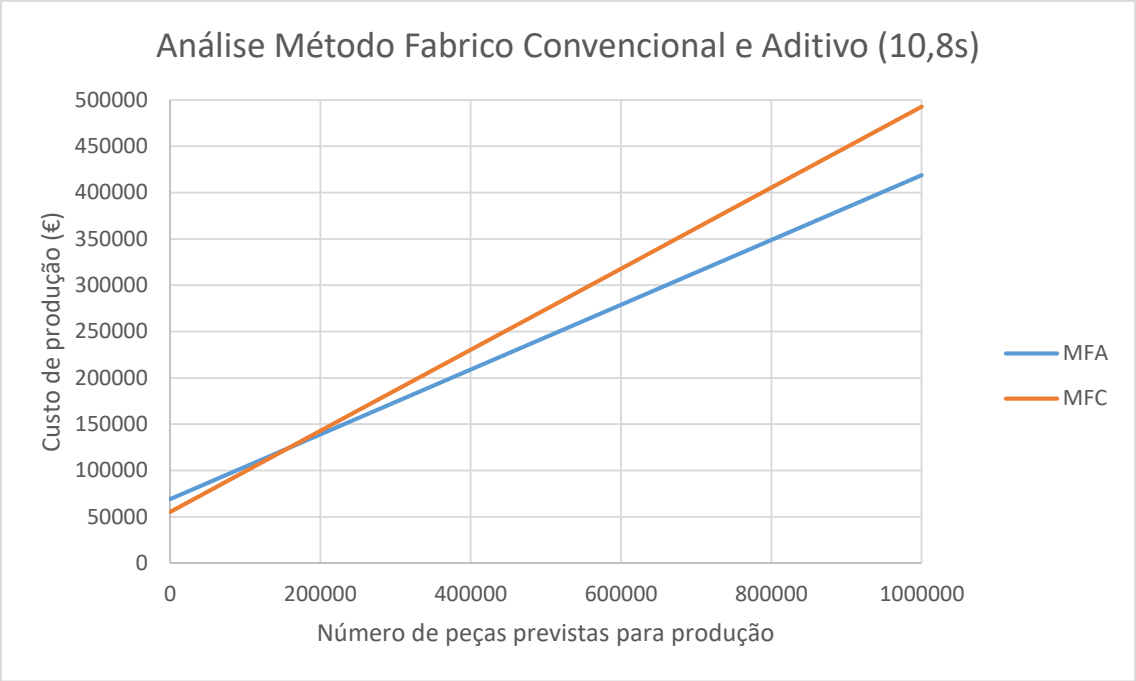


Figura 28 - Análise entre os dois processos convencional e fabrico aditivo para um tempo de arrefecimento de 10,8 segundos.

Na Figura 28 está representado o custo de produção em relação ao número de peças previstas para produção num ciclo de arrefecimento de 10,8 segundos menos 7 segundos que o original. Segundo a análise deste gráfico interpretamos que quando o número de peças previstas para produção é 0, obtemos o custo do molde no eixo Y sendo de 55.251 € para o método convencional e de 68.954 € para o método fabrico aditivo.

Contudo, a análise deste centralizou-se na interpretação do ponto de equilíbrio que indica o limiar de rentabilidade (*break-even point)*, onde o método de fabrico aditivo começa a compensar, ou seja, apresenta um custo de produção mais baixo que o método convencional. Visualmente este ponto é representado pela interseção das duas retas. Este ponto é representado no gráfico pelos seguintes valores: X=156605; Y=123765.

Por outro lado, através da comparação das retas no gráfico (Figura 28) para o mesmo valor de X (mesmo número de peças previstas para produção) entre os dois métodos, a diferença entre os valores de Y representa ganho obtido na produção. Assim, utilizando o exemplo concreto da análise em estudo, para 750.000 de peças previstas para produção iremos ter um ganho de 51.907 €.

Desta forma, foi possível obter as seguintes tabelas (Tabelas 15, 16 e 17) para comparar os dois processos quando existe uma redução de 4 segundo na etapa de arrefecimento:

Tabela 15 - Custo total de produção pelo método convencional para um arrefecimento de 17,8 segundos

Método Convencional - Arrefecimento de 17,8 segundos	
Número de peças previstas para produção	Custo total de produção (€)
0	55.251
250.000	164.626
500.000	274.001
750.000	383.376
1.000.000	492.751

Tabela 16 - Custo total de produção pelo método de fabrico aditivo para um arrefecimento de 13,8 segundos

Método Fabrico Aditivo - Arrefecimento de 13,8 segundos	
Número de peças previstas para produção	Custo total de produção (€)
0	68.954
250.000	165.829
500.000	262.704
750.000	359.579
1.000.000	456.454

Tabela 17 - Ganhos entre os dois processos convencional e fabrico aditivo para uma redução de 4 segundos

Ganhos entre os dois processos - Redução de 4 segundos	
Número de peças previstas para produção	Ganho total de produção (€)
0	-13.703
250.000	-01.203
500.000	11.297
750.000	23.797
1.000.000	36.297

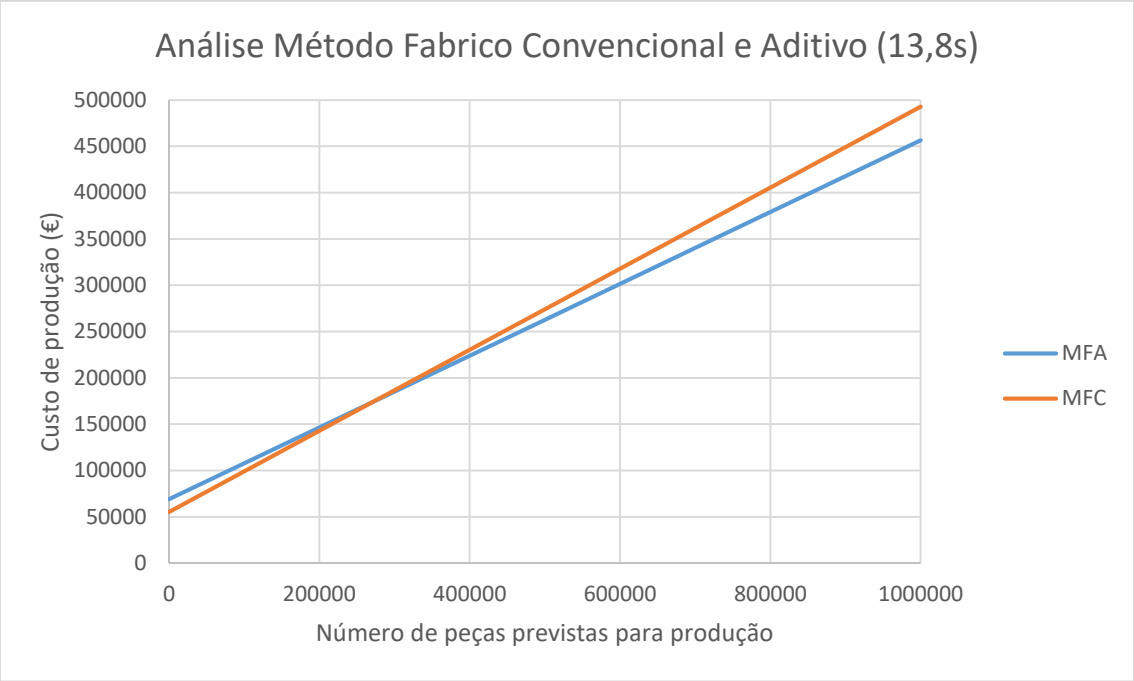


Figura 29 - Análise entre os dois processos convencional e fabrico aditivo para um tempo de arrefecimento de 13,8 segundos.

Na Figura 29 está representado o custo de produção em relação ao número de peças previstas para produção, num ciclo de arrefecimento de 13,8 segundos, menos 4 segundos que o original. Segundo a análise deste gráfico interpretamos que quando o número de peças previstas para produção é 0, obtemos o custo do molde no eixo Y sendo 55.251 € para o método convencional e 68.954 € para o método fabrico aditivo. Uma vez que o custo do molde não varia com a redução do tempo de arrefecimento.

Contudo, a análise deste centralizou-se na interpretação do ponto de equilíbrio que indica o limiar de rentabilidade (*break-even point)*, onde o método de fabrico aditivo começa a compensar, ou seja, apresenta um custo de produção mais baixo que o método convencional. Visualmente este ponto é representado pela interseção das duas retas. Este ponto é representado no gráfico pelos seguintes valores: X=274055; Y=175150.

Por outro lado, através da comparação das retas no gráfico (Figura 29) para o mesmo valor de X (o mesmo número de peças previstas para produção) entre os dois métodos, a diferença de valores de Y representa o ganho obtido na produção. Assim, utilizando o exemplo concreto da análise em estudo, para 750.000 peças previstas para produção iremos ter um ganho de 23.797 €.

Desta forma, com a redução da etapa de arrefecimento foi necessário produzir menos peças para que o método de fabrico aditivo seja mais favorável que o método convencional e consequentemente menor custo

total comparando com uma situação onde a etapa de arrefecimento é mais longa.

5.Conclusão

Finalmente, com a forma dos canais de arrefecimento conformado elaborados nesta dissertação conseguimos obter três fatores importantes que refletem na qualidade deste sistema de arrefecimento. Este sistema vai apresentar uma redução do tempo de ciclo, temperatura da peça e marcas de contração comparativamente com o sistema convencional utilizado para produzir o mesmo tipo de peça. Com isto, consegue-se obter um produto final com ótimo acabamento superficial, caraterísticas que demonstram que os parâmetros do processo estão adequados.

Relativamente aos canais conformados presentes nesta peça foi possível obter uma menor diferença entre a temperatura de entrada e saída dos canais e pequeno agravamento do empeno da peça globalmente e na componente Z. Isto pode dever-se à utilização de *solvers* diferente para os ensaios reológicos utilizados nos diferentes sistemas de arrefecimento (convencional e conformado). Assim, pequenas alterações nos valores de empenos nos ensaios pode estar associado às diferentes precisões dos *solvers* utilizados para o cálculo dos resultados.

Em relação, à implementação destes canais conformados presentes nesta peça foi possível obter um maior ganho na produção deste sistema de 51.992 € devido a conseguir-se reduzir a etapa de arrefecimento promovendo o aumento de ganhos a cada segundo reduzido. A redução de custos de produção entre os dois sistemas foi de 13,5%. Deste modo, estes ganhos poderão ser insignificantes para a implementação deste sistema devido ao risco associado ao tempo de vida dos insertos nesta tecnologia.

No entanto, é necessário ter em conta as propriedades mecânicas do molde produzido por fabrico aditivo. Com isto, é necessário fazer um estudo do tempo de vida expectável dos insertos com o sistema conformado. Estudos futuros laboratoriais devem ser realizados para estudar o comportamento dos elementos moldantes ao longo do seu ciclo de vida. Ensaios de resistência ao desgaste, resistência à corrosão e resistência à fadiga são os principais para uma análise aprofundada e conclusiva para o ciclo de vida de um molde criado por processos fabrico aditivos.

6.Perspetivas de trabalho futuro

Esta dissertação tem potencial para investigar outras áreas adjacentes ao arrefecimento conforme, pois a área dos moldes é complexa apresentando muitas variáveis. No entanto, para trabalhos futuros é possível estudar o impacto que a alteração da geometria das secções dos canais apresenta para o arrefecimento. Outro fator será avaliar se a rugosidade das paredes dos canais tem impacto no arrefecimento da peça, sendo que na simulação os canais utilizados são completamente lisos. A possibilidade de transformar esta dissertação num trabalho prático, com o intuito de certificar os resultados obtidos que irá trazer mais valor para a indústria dos moldes.

No entanto, haverá a possibilidade de explorar esta área, noutra vertente focada mais no fabrico aditivo e na respetiva produção do molde. Com a tecnologia que está disponível nos dias de hoje é possível simular o processo de fabrico aditivo através da aplicação *Materialise Magics*, que permitem antever os defeitos, imprevistos, acumulação de tensões possíveis durante a produção do molde. Esta etapa faz-se devido aos custos associados à impressão de uma peça por fabrico aditivo, neste caso um inserto, e à possibilidade de contrações comuns durante a criação dos elementos moldantes.

A análise do processo mais adequado para a impressão do molde com esta tecnologia de arrefecimento conformado seria uma continuação possível para esta dissertação em conjunto com a discussão dos respetivos parâmetros, de ciclo de vida, a necessidade de suportes, o material mais indicado para os insertos para que a produção destes sejam mais eficientes. Nesta situação, simulou-se a produção dos insertos através da tecnologia SLM, contudo seria interessante entender se outros processos (DMLS) teriam mais produtividade, menos custos e caraterísticas idênticas de impressão.

O futuro desta tecnologia passa por criar um molde de raiz para que as vantagens deste sistema sejam mais percetíveis uma vez que o trabalho desta dissertação foi estudar a influência do sistema de arrefecimento conformado num molde já existente.

7.Bibliografia

[1] Cadflow, “Quem somos venha conhecer a Cadflow”, Acedido em 1 de maio 2022, https://www.cadflow.pt/sobre.php.

[2] Feng, Shaochuan; Amar M.Kamat and Yutao Pei. “Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 171 (2021): 121082.

[3] Hall, Melissa and Mark Krystofik. “White Paper Conformal Cooling”, Rochester Institute of Technology, (2015): 1-6.

[4] Steiko, W. “Avaliação do projeto térmico do molde garante qualidade e redução de custos”. Plástico Industrial, no. 1 (2004): 64-71.

[5] Centimfe, “Manual do projectísta para moldes de injecção de plástico”. Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plástico. 2003.

[6] Shoemaker, J. “Moldflow Design Guide - A Resource for Plastics Engineers”. Framingham, Massachusetts, U.S.A: Moldflow Corporation, 1st ed. 2006.

[7] Tim Ruffner, “Success with Conformal Cooling Using Direct Metal Laser Sintering”. Acedido maio 25, 2022. https://www.moldmakingtechnology.com/articles/success-with-conformalcooling- using-direct-metal-laser-sintering.

[8] EMMELMANN, C. and HERZOG, D. and KRANZ, J. “Laser Additive Manufacturing - Materials, Design, Technologies, and Applications” In *Design for laser additive manufacturing*, edited by Milan Brandt, 259–281. Woodhead Publishing, 2007.

[9] Jahan, S. A.; T. Wu; Y. Zhang; J. Zhang; A. Tovar and H. Elmounayri. “Thermo-mechanical Design Optimization of Conformal Cooling Channels using Design of Experiments Approach”, Procedia Manuf., Vol. 10 (2017): 898–911.

[10] Marques, Sabrina; Adriano Fagali de Souza; Jackson Roberto de Miranda and Ihar Yadroitsau. “Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation”, Polímeros, Vol. 25 (2015): 564-574.

[11] Parker, H. S. and N.H. Pham. “DESIGN OF CONFORMAL COOLING CHANNELS FOR AN AUTOMOTIVE PART”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 13 (2012): 293-300.

[12] MAYER, Siegfried. “Optimised mould temperature control procedure using DMLS” EOS GmbH, (2009): 1-10.

[13] AS, B. VAN et al. “Direct Metal Laser Sintering Using Conformal Cooling for High Volume Production Tooling”, The South African Journal of Industrial Engineering, no. 28 (2017): 170-182.

[14] Torres-Alba, Abelardo; Jorge Manuel Mercado-Colmenero; Juan De Dios Caballero-Garcia and Cristina Martin-Doñate. “A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds”, Polymers, Vol. 13 (2021): 2-22.

[15] Wahab, Md Saidin; Azli Amin Ahmad Raus; Irwan Amir; Aqeel Bhutto and Khairu Kamarudin. “The Thermal Effect of Variate Cross-Sectional Profile on Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Moulding”, International Journal of Integrated Engineering, Vol. 10 (2018): 156-163.

[16] Chantzis, Dimitrios; Xiaochuan Liu; Denis J. Politis; Omer El Fakir; Teun Yee Chua; Zhusheng Shi and Liliang Wang. “Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 109 (2020): 87-107.

[17] Kruth, J. P.; M. Badrossamay; E. Yasa; J. Deckers; L. Thijs; and J. Humbeeck. “Part and material properties in selective laser melting of metals”. 16th International Symposium on Electromachining, ISEM 2010.

[18] IQTEMP “Refrigeração Conformada por Excelência”. Acedido 12 maio, 2022. https://www.iqtemp.com/fileadmin/user_upload/downloads/iQtemp_GmbH_Broschuere_PT.pdf.

[19] Jack, William Josiah, "A Six Sigma Approach to Implementing Conformal Cooling on Existing Processes in Injection Molding" (2017). Theses. 2214. http://opensiuc.lib.siu.edu/theses/2214.

[20] Duleba, B. and Frantisek Greskovic. “Conformal Cooling for Plastics Injection Moulding”, Strojar (2012): 1-5.

[21] Wenext, “DMLS vs SLM - What is' the difference?”, Acedido em 30 de maio 2022, https://www.wenext.com/blog/3D-Printing/dmls-vs-slm.

[22] KRANZ, J. and HERZOG, D. and EMMELMANN, C. “Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4”, Journal of Laser Applications, no.27 (2015).

[23] Siemens, “Synchronous Technology”, Acedido em 3 de junho 2022, https://solidedge.siemens.com/pt-br/solutions/products/3d-design/synchronous-technology/#ui_Fast_and_Flexible_Design_Creation.

[24] Cadflow, “Produtos SIEMENS NX”, Acedido em 4 de junho 2022, https://www.cadflow.pt/produtos.php?prod=NX.

[25] Cadflow, “Produtos AUTODESK - MOLDFLOW”, Acedido em 8 de junho 2022, https://www.cadflow.pt/produtos.php?prod=MOLDFLOW.

[26] Autodesk, “Setting up a conformal cooling analysis - overview”, Acedido em 19 de julho 2022, https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-B953FFDE-B7EF-4ED2-87CB-EDD8586F6528-htm.html.

[27] Cadflow, “Produtos CADFLOW - QUICKQUOTE”, Acedido em 10 de junho 2022, https://www.cadflow.pt/produtos.php?prod=QUICKQUOTE.

[28] Covestro, “Plastics Makrolon® 1260”, Acedido em 12 de junho 2022, https://solutions.covestro.com/en/products/makrolon/makrolon-1260_56976896-00009633?SelectedCountry=PT.

[29] Ramada Aços, “Aços de Construção Ligados 2738 HH”, Acedido em 13 de junho 2022, https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ligados/2738-hh-.html.

[30] Rovalma, “Hot Work Tool Steel 1.2343 ESR”, Acedido em 14 de junho 2022, https://rovalma.com/wp-content/uploads/2017/03/1-2343-ESR.pdf.

[31] Meusburger, “1.2343 / 1.2343 ESU Hot-work steel”, Acedido em 15 de junho 2022, https://www.meusburger.com/PT/PT/material-grades/12343-12343-esr-hot-work-steel-die-making.

[32] EOS, “EOS ToolSteel 1.2709”, Acedido em 16 de junho 2022, https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/material_datasheet_eos_toolsteel_1.2709_premium_en_2020_web.pdf.

8.Anexos

Anexo I

Durante o estágio, assistiu a outras formações presenciais, como por exemplo, sobre sensores para moldes de injeção plástica, que permitem analisar dados para otimizar o processo, lecionadas pelo Engenheiro Luís Soares representante da *Kistler* em Portugal. Por fim, a participação em *webinares* permitiu alargar o conhecimento sobre temas relacionados. Alguns dos quais que participou estão aqui listados:

i. *Industrializing Additive Manufatering Series: Definition of requirements, Topology Optimization, Design Adaption, Design Validation, Additive Manuf. Design Checkers, Part Positioning, Build Preparation, AM Process Simulation – Siemens Digital* – Eng. Rodrigo Fraga;
ii. *Reduce Costs and Lead Time with 3D Printed Molds – Formlabs;*
iii. *Bridging The Gap of 3D Printing and Aluminium – 3D Systems;*
iv. *Injection Molded Parts in <24 Hours? Low-Volume Injection Molding 101 – Formlabs;*
v. *Benefits of Large-Format 3D Printing – Formlabs;*
vi. *Low-Volume Rapid Thermoforming With 3D Printed Molds – Formlabs.*

Certificado de Formação da *CADFlow* de *NX Base*

CADFLOW_

CERTIFICADO DE FORMAÇÃO

A CADFLOW certifica que Daniel Cordeiro da Silva Lagarto

da empresa Cadflow

frequentou a ação de formação NX Base

com a duração de 32 horas.

MÓDULOS LECIONADOS

- NX GATEWAY
- NX SKETCH
- NX MODELING
- NX SURFACES
- NX ASSEMBLIES

DATA: 2,3,4 e 7 de Março de 2022

LOCAL: CADFLOW

NX

O Formador: Miro Dark

A Gerência:

Edifício Vangest Estrada de Leiria 210 – P.O. Box 11
2431-901 Marinha Grande | Portugal
Tel +351 244 090 110 | Fax +351 244 090 119
info@cadflow.pt | www.cadflow.pt
Contribuinte nº 504 058 240
Capital Social 50.000 Euros – C.R.C Mª Grande

Anexo II

Tabela A1 – Propriedades do PC Makrolon 1260

Propriedades gerais	
Densidade	1200 kg/m^3
Propriedades mecânicas	
Propriedades de impacto de punção (23˚C)	4800 N
Deformação de cedência (50 mm/min)	5.8 %
Tensão de cedência (50 mm/min)	63 MPa
Propriedades térmicas	
Temperatura de transição vítrea (10 ˚C/min)	142 ˚C
Condutividade térmica, através do plano (23 ˚C; 50 % r. h.)	0.2 W/(m*K)
Propriedades reológicas	
Taxa de fluxo de massa de fusão (300 ˚C/ 1.2 kg)	36 g/10 min
Taxa de fluxo de volume de fusão (300 ˚C/ 1.2 kg)	33 cm^3/10 min
Retração do material no molde, normal (60x60x2 mm/ 500 bar)	0.7 %
Retração do material no molde, paralelo (60x60x2 mm/ 500 bar)	0.65 %
Propriedades reológicas	
Velocidade de injeção	200 mm/s
Temperatura de fusão	280 ˚C
Temperatura do molde	90 ˚C
Temperatura de solidificação	130 º C

Tabela A2 – Propriedades do aço 2738 HH

Propriedades	
Dureza	375 HB
Densidade	7.80 Kg/dm3
Coeficiente de Dilatação Térmica (20 a 200ºC)	12.9E-6 m/mK
Condutibilidade Térmica (20ºC)	34.5 W/mK
Módulo de Elasticidade (20ºC)	205 GPa

Tabela A2.1 – Composição química do aço 2738 HH

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
%	0.40%	0.30%	1.45%	0.030%	0.030%	1.95%	0.20%	1.15%

Tabela A2.2 – Tratamento Térmico do aço 2738 HH

Tratamento Térmico	
Tipo de Tratamento	Revenido
Temperatura	200 – 650ºC
Meio de Arrefecimento	Azoto
Dureza	28 – 50 HRC

Tabela A3 – Propriedades do aço 2343 ESR

Propriedades	
Dureza	230 HB
Densidade (300K)	7.80e3 Kg/m3
Resistência Mecânica (300K)	1850 MPa
Resistência à tração 0.2% (300K)	1570 MPa
Deformação (300K)	10.7 %
Coeficiente de Dilatação Térmica (20 a 200ºC)	12.9E-6 m/mK
Condutividade Térmica (200ºC)	27 W/mK
Módulo de Elasticidade (300K)	216e3 MPa

Tabela A3.1 – Composição química do aço 2343 ESR

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0.38%	1.15%	0.40%	5.35%	1.25%	0.40%

Tabela A4 – Propriedades do aço ferramenta 1.2709

Propriedades	
Dureza	57 HRC
Resistência mecânica (Componente Vertical)	2260 MPa
Tensão de cedência (Componente Vertical)	2180 MPa
Alongamento até fratura (Componente Vertical)	3,3 %
Resistência à fadiga ($1x10^7$ ciclos em estado tratado termicamente)	732 MPa

Coeficiente de Expansão Térmica (Temperatura de 25 a 200ºC)	$11{,}15x10^{-6}/K$
Resistência ao impacto	10 J

Tabela A4.1 – Composição química do aço ferramenta 1.2709

Elementos	**C**	**Ni**	**Co**	**Mo**	**Ti**
% min. – max.	max. 0.03	17.00 – 19.00	8.50 – 10.00	4.50 – 5.20	0.80 – 1.20

Anexo III

Tabelas de orçamentação geradas pelo QuickQuote

CADFLOW_

Quotation for Mould

PROJ REF: _____ QNR: CFW 2022/0040

CUSTOMER: Daniel Lagarto **CONTACT:**

CUSTOMER REF: **IDENTIFICATION:** Rear_light

SPECIFICATIONS

- **INFORMATION SUPPORT:**

☐ Paper Drawing ☐ 2D File ☒ 3D File ☐ Sample

- **MOULD TYPE:** Injection - **MOULDING MATERIAL:** ABS - **MACHINE:** Engel 300T

- **PARTS**

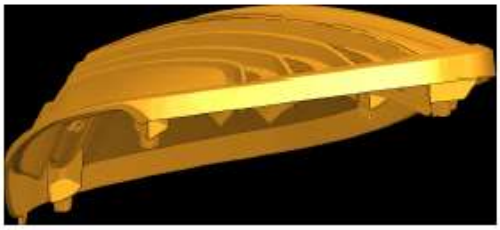
Rear_light	Maximum Part Dimensions	Number of Cavities
	+/- 289.7x209.3x230.7 mm	1+1

STEELS:	REF	HRC	Heat Treatment	Surface Finishing
MOULD BASE	1.1730 / 1.2344	46 - 50	-	-
CAVITY	1.2343ESR	~54	Hardened	Shiny
CORE	1.2738 HH (P20)	37 - 43	Pre-hardened	Normal
INSERTS	1.2343ESR	~54	Hardened	-
SLIDES	1.2738 HH (P20)	37 - 43	Pre-hardened	-

- **STANDARDS:** USER-DEFINED
- **INJECTION:** Hotrunner: 1x Valve Gate Nozzle from Synventive
- **EJECTION:** Pins + Flats
- **SLIDES:** 2x Mech.
- **LIFTERS:** 6x Mech.

Preliminary mould drawings + final mould drawings + ty-outs (raw material to be supplied by the costumer) are included in these specifications

NOTES:



TERMS

PRICE: 182.256,00 € EXW - VA Tax excluded - Valid until 30 days

DELIVERY: (Between preliminay mould drawings approval and 1st samples. Possibility of readjustment when prevision of start is defined)

PAYMENT: 35% 60 days with order + 35% (8 days) with 1st samples + 30% (8 days) with the mould delivery

Withholding of Property - In the terms of the article 409 of the civil code, Cadflow withholds the ownership of the supplied merchandise under this proposal, while the full value remains unpaid, and may any time implement it's rights, claiming the merchandise.

Date

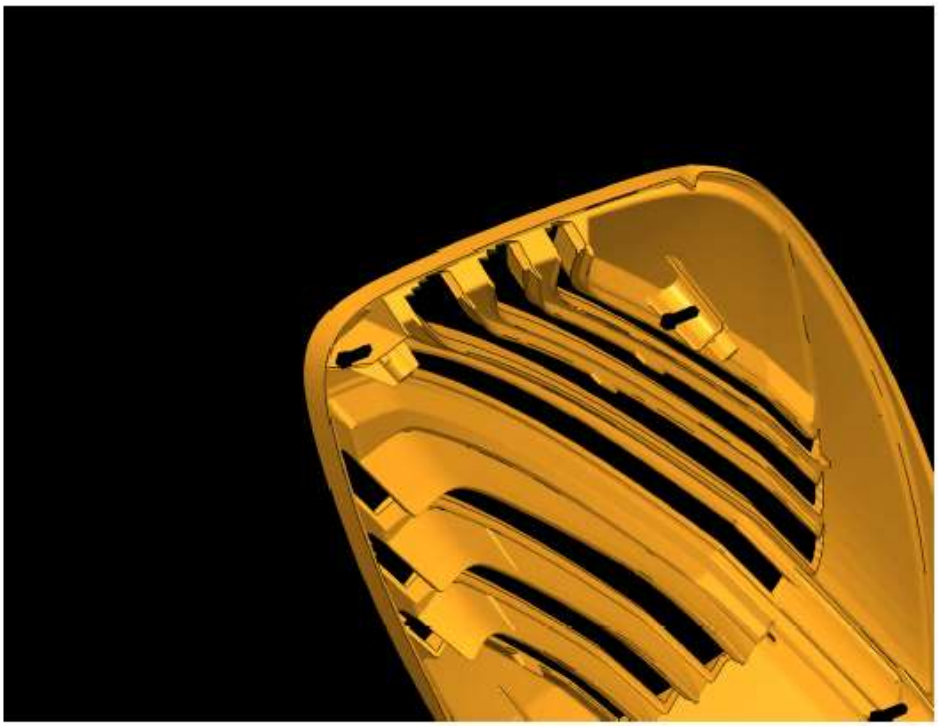
HGodinho

Tel: 244090110 E-mail: h.godinho@cadflow.pt

Created with QuickQuote v1.1000 - © 2003-2022 by Cadflow, Lda

QUICK QUOTE	HG	Views	DATE	12/07/2022	QNR	CFW 2022/0040

Scale 10:18



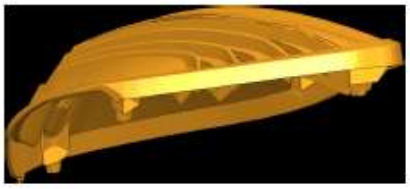
VIEW 1

Part: [Rear_light]
Dimensions: 289,7 x 209,3 x 230,7 mm

Created with QuickQuote v1.1000 © 2003-2022 by CadFace, Lda.

QUICK QUOTE	HG	Overview	DATE	12/07/2022	QNR	CFW 2022/0040

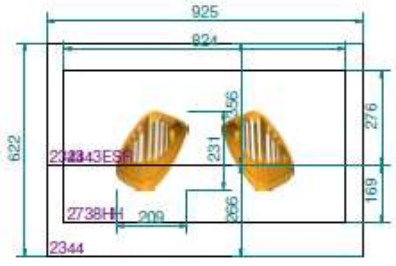
PROJECT NAME					
PART INFO					
Clamp Force [min-max]	202.7 tf	Mold Size	max. 798x925x622 mm	Mold Weight	~3604.2 kg
Part Name		Dimensions	Material	Proj.Area	Weight
Rear_light		289.7x209.3x230.7 mm	ABS	305.80 cm²	201.5 g



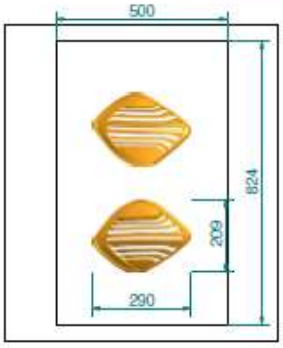
PROJECT CAD/CAM	18.226 €	10.0 %
MOLD FLOW ANALYSIS	5.468 €	3.0 %
RAW MATERIAL	37.794 €	20.7 %
MOLDING AREA	13.764 €	7.6 %
MOLDBASE	23.950 €	13.1 %
SLIDES	80 €	0.0 %
INSERTS	0 €	0.0 %
HEAT TREATMENT	16.910 €	9.3 %
INJECTION SYSTEM	4.100 €	2.2 %
ACCESSORIES	3.452 €	1.9 %
MACHINING	68.305 €	37.5 %
MOLDING AREA	38.121 €	20.9 %
Milling	16.229 €	8.9 %
Erosion	221 €	0.1 %
Wire Erosion	1.129 €	0.6 %
Drilling	4.869 €	2.7 %
Lathe	988 €	0.5 %
Grinding	3.088 €	1.7 %
Electrodes	11.598 €	6.4 %
MOLDBASE	24.184 €	13.3 %
Milling	11.216 €	6.2 %
Drilling	3.365 €	1.8 %
Pre-Milling	1.250 €	0.7 %
Conventional CNC	8.353 €	4.6 %
SLIDES	6.000 €	3.3 %
INSERTS	0 €	0.0 %
POLISHING	2.345 €	1.3 %
WORKBENCH	10.206 €	5.6 %
TRY OUTS	870 €	0.5 %
DIMENSIONAL CONTROL	5.468 €	3.0 %
TUNING	9.113 €	5.0 %
CHEMICAL TEXTURE	0 €	0.0 %
INCOTERMS	0 €	0.0 %

MATERIAL+TREATMENT COST	54.704 €
SUPPLIED PARTS COST	7.552 €
FINAL COST	182.256 €
DELIVERY TIME	weeks

Right



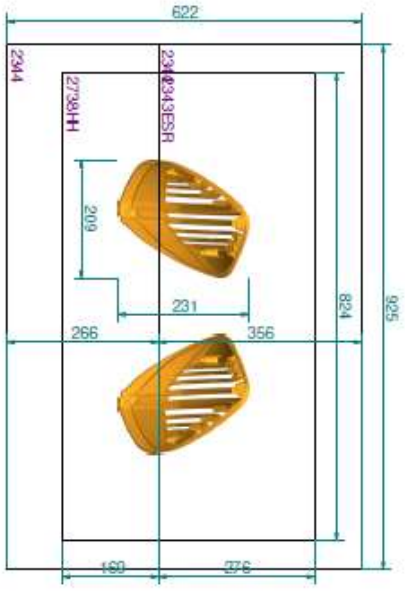
Top



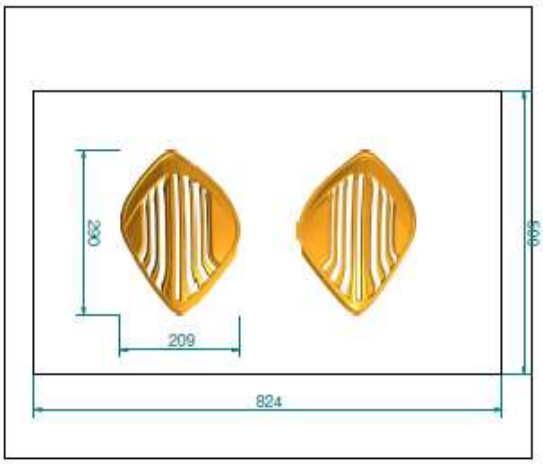
Created with QuickQuote v1.1000 - © 2003-2022 by Cadflow, Lda

QUICK QUOTE	HG	Moldbase	DATE	12/07/2022	QNR	CFW 2022/0040

Right



Top



Author : HGodrino 20/07/2022 16:10 Pag. 4

Created with QuickQuote v1.0000 - © 2003-2022 by Cadflow, Ltd.

QUICK QUOTE	HG	Details	DATE	12/07/2022	QNR	CFW 2022/0040

PART INFO

Clamp Force [min-max]	202.7 tf	Mold Size	max. 798x925x622 mm	Mold Weight	~3604.2 kg

Part Name	Dimensions	Material	Proj.Area	Weight
Rear_light	289.7x209.3x230.7 mm	ABS	305.80 cm²	201.5 g

PROJECT CAD/CAM					18.226 €	10.0 %
Time	520:44 h	Hourly Rate	35.00 €/h			
MOLD FLOW ANALYSIS					5.468 €	3.0 %
Time	136:42 h	Hourly Rate	40.00 €/h			
RAW MATERIAL					37.794 €	20.7 %
MOLDING AREA					13.764 €	7.6 %

	Material	Dimensions	Volume	Weight	Cost/kg	Cost
Cavity	1.2343ESR	504.0x828.0x350.0 mm	146078.45 cm³	1146.7 kg	9,00 €	10.320 €
Core	1.2738 HH (P20)	504.0x828.0x333.7 mm	139254.26 cm³	1093.1 kg	3,15 €	3.443 €

MOLDBASE					23.950 €	13.1 %
Catalog	User-Defined	Complexity	Normal	Num Cavities	2	
Material	1.1730	Dimensions	max. 798x925x622 mm	Mold Weight	~3604.2 kg	

	Material	Dimensions	Volume	Weight	Cost/kg	Cost
Cavity	1.2344	802x929x360 mm	268220.88 cm³	2105.5 kg	6.50 €/kg	13.686 €
Core	1.2344	802x929x270 mm	201165.66 cm³	1579.2 kg	6.50 €/kg	10.264 €

SLIDES					80 €	0.0 %

	Material	Type	Weight	Cost/kg	Cost
2x Lifter-1	1.2738 HH (P20)	Mech.	0.1 kg	3.15 €/kg	20 €
2x Slider-2	1.2738 HH (P20)	Mech.	0.2 kg	3.15 €/kg	20 €
2x Lifter-3	1.2738 HH (P20)	Mech.	0.0 kg	3.15 €/kg	20 €
2x Lifter-4	1.2738 HH (P20)	Mech.	0.0 kg	3.15 €/kg	20 €

INSERTS					0 €	0.0 %
HEAT TREATMENT					16.910 €	9.3 %

	Treatment	Cost/kg	Cost
Cavity	Hardened	3.50 €/kg	4.014 €
Cavity Plate	Hardened	3.50 €/kg	7.369 €
Core	Pre-hardened	0.00 €/kg	0 €
Core Plate	Hardened	3.50 €/kg	5.527 €
Slides	Pre-hardened	0.00 €/kg	0 €
Inserts	Hardened	3.50 €/kg	0 €

INJECTION SYSTEM					4.100 €	2.2 %
Type	Hotrunner	Catalog	Synventive			
Manifold Shape	none	Cost	0 €			
Nozzles	1x Valve Gate	Cost	4.100 €			
ACCESSORIES					3.452 €	1.9 %
Components					700 €	0.4 %
Ejection System					2.752 €	1.5 %
Type	Pins + Flats	Complexity	Simple			
Slide Custom Actions					0 €	0.0 %
MACHINING					68.305 €	37.5 %
MOLDING AREA					38.121 €	20.9 %
Milling					16.229 €	8.9 %
Milling Hourly Rate	40,00 €/h	Prep. Hourly Rate	40,00 €/h			

	Vol. Removal	Rough Rate	Finish Rate	Time	Prep. Time	Cost
Cavity	37.82 %	28000 mm³/min	70 mm³/min	202:37 h	30:23 h	9.320 €
Core	29.63 %	28000 mm³/min	70 mm³/min	150:11 h	22:32 h	6.909 €

Erosion					221 €	0.1 %
Erosion Hourly Rate	32,00 €/h	Prep. Hourly Rate	32,00 €/h			

	Vol. Removal	Removal Rate	Time	Prep. Time	Cost
Cavity	0.00 %	58 mm³/min	1:05 h	1:00 h	67 €
Core	0.00 %	58 mm³/min	3:49 h	1:00 h	154 €

Wire Erosion					1.129 €	0.6 %
Cavity					648 €	0.4 %
Core					481 €	0.3 %

Created with QuickQuote v1.1000 - © 2009-2022 by Cadflow, Lda.

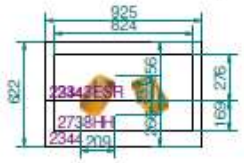
QUICK QUOTE	HG	Details	DATE	12/07/2022	QNR	CFW 2022/0040

Drilling								4.869 €	2.7 %
Drilling Hourly Rate	23.00 €/h		Prep. Hourly Rate	23.00 €/h					
	Mach. Factor		Time	Prep. Time	Cost				
Cavity	0,50		101:18 h	20:16 h	2.796 €				
Core	0,50		75:06 h	15:01 h	2.073 €				
Lathe								988 €	0.5 %
Cavity								567 €	0.3 %
Core								421 €	0.2 %
Grinding								3.088 €	1.7 %
Cavity								1.544 €	0.8 %
Core								1.544 €	0.8 %
Electrodes								11.598 €	6.4 %
MOLDBASE								24.184 €	13.3 %
Milling								11.216 €	6.2 %
Milling Hourly Rate	40.00 €/h		Prep. Hourly Rate	40.00 €/h					
	Vol. Removal		Rough Rate	Finish Rate	Time	Prep. Time	Cost		
Cavity Plate	42.47 %		28000 mm³/min	70 mm³/min	135:19 h	20:18 h	6.224 €		
Core Plate	34.71 %		28000 mm³/min	70 mm³/min	108:31 h	16:17 h	4.992 €		
Drilling								3.365 €	1.8 %
Drilling Hourly Rate	23.00 €/h		Prep. Hourly Rate	23.00 €/h					
	Mach. Factor		Time	Prep. Time	Cost				
Cavity Plate	0,50		67:39 h	13:32 h	1.867 €				
Core Plate	0,50		54:15 h	10:51 h	1.498 €				
Pre-Milling								1.250 €	0.7 %
Conventional CNC								8.353 €	4.6 %
SLIDES								6.000 €	3.3 %

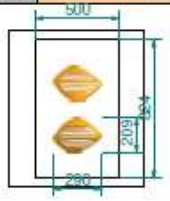
	Type	Cost
2x Lifter-1	Simple Mech.	1.500 €
2x Slider-2	Simple Mech.	1.500 €
2x Lifter-3	Simple Mech.	1.500 €
2x Lifter-4	Simple Mech.	1.500 €

INSERTS								0 €	0.0 %
POLISHING								2.345 €	1.3 %
Hourly Rate	24.00 €/h								
	Surface Finish		Time		Cost				
Cavity	Shiny		56:59 h		1.368 €				
Core	Normal		40:43 h		977 €				
WORKBENCH								10.206 €	5.6 %
Time	425:16 h		Hourly Rate	24.00 €/h					
TRY OUTS								870 €	0.5 %
Machine	Engel 300T		Nr Try Outs	3	Time	15:00 h	Hourly Rate	58.00 €/h	
DIMENSIONAL CONTROL								5.468 €	3.0 %
Time	136:42 h		Hourly Rate	40.00 €/h					
TUNING								9.113 €	5.0 %
CHEMICAL TEXTURE								0 €	0.0 %
Cavity	0 €		Core	0 €					
INCOTERMS								0 €	0.0 %
Type	Ex Works (EXW) -						Mold Weight (kg)	~3604	
COMMISSION								0 €	0.0 %
					FINAL COST			182.256 €	
					DELIVERY TIME			weeks	

Right



Top



Created with QuickQuote v1.1000 - © 2009-2022 by CadFlow, Lda.