

APLICAÇÃO DE CAE PARA A INDÚSTRIA DE MOLDES

DIOGO PARENTE MARTINS VEIGA COELHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO INTEGRADO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

VITOR MANUEL BRANCO MARTINS AUGUSTO

ORIENTADOR

PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CANDIDATO Diogo Parente Martins Veiga Coelho *CÓDIGO* 201306517

TÍTULO Aplicação de CAE para a Indústria de Moldes

DATA 17 de Maio de 2021

LOCAL Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto - 15:00

JÚRI

PRESIDENTE Carlos Silva Ribeiro DEMM/FEUP

ARGUENTE Carlos Moura Relvas DEM/UA

ORIENTADOR Vitor Martins Augusto DEMM/FEUP

Resumo

A indústria de moldes em Portugal é um setor de atividade económica altamente exportador, com forte presença e reputação nos mercados internacionais. Apesar do elevado apetrecho tecnológico e investimento na inovação, a aposta interna em tecnologia CAE de fluxo de plásticos na indústria de moldes é escassa, o que resulta na subcontratação dos estudos, por imposição dos clientes.

Neste sentido, desenvolveu-se em primeiro lugar um questionário para averiguar os custos associados à realização dos ensaios de moldes e respetivos ajustes. O número de respostas, embora aproveitado, esteve muito abaixo do pretendido, o que não permitiu uma abordagem representativa da situação global do setor, sendo este facto sintomático do pouco interesse existente na exploração do potencial desta tecnologia. A abordagem ao caso em estudo alterou-se e, através da *NORCAM*, estabeleceu-se contacto com a *Azemoldes* para colaborar no desenvolvimento de um estudo de uma peça em *Moldflow Insight Premium* e realização de uma análise SWOT sobre a “Implementação de *Moldflow* na *Azemoldes*”.

O estudo elaborado permitiu constatar a existência de uma zona da peça que não permitia o fluxo ideal do plástico, de modo equilibrado e uniforme ao longo da peça, sem consequência para a integridade estrutural da peça. A contração volumétrica apresentou valor médio de aproximadamente 6%.

Através da análise SWOT para uma empresa como a *Azemoldes* não é possível distinguir claramente uma decisão a tomar no que diz respeito à implementação de *Moldflow*, dada a indeterminação do investimento em formação de recursos humanos e tempo até os processos decorrerem como esperado, trazendo uma verdadeira vantagem competitiva à empresa.

Palavras-Chave

Indústria de Moldes, Injeção de Plástico, Construção de Moldes, *Moldflow*

Abstract

The Portuguese mold industry is an economic sector with strong export drive, being present and enjoying a sound reputation in international markets. Continuous technological upgrades and innovation are not met with investment in CAE tools for plastic flow simulation at company level, which results in subcontracting studies, by client demand.

A survey was conducted aiming to determine which costs are involved in mold testing and adjusting, and also to what extent CAE software tools (namely *Moldflow*) are perceived as useful. The number of responses was well below expected; still the answers were considered for the present work. Even though this did not allow for a representative approach to the global position of this industrial sector, it is, however, indicative of a general lack of interest in harnessing the full potential of this technology. This entailed a shift in the strategy to approach the case under consideration. Through *NORCAM*, contacts were made with *Azemoldes* to perform a study of a car part using *Moldflow Insight Premium* and a SWOT analysis on the impact of implementing *Moldflow* in *Azemoldes*.

The study concluded that there was an area that prevented the plastic from flowing in a balanced, uniform, ideal way along the part. Volumetric shrinkage values were 6% on average.

The SWOT analysis on a company such as *Azemoldes* was not enough to support a definitive decision on the implementation of *Moldflow* since it was unclear whether the amount of time needed for procedures to work as expected in relation to the investment in training of human resources would result in a true competitive edge.

Keywords

Mold Industry, Plastic Injection, Mold Making, *Moldflow*

Agradecimentos

Não existem percursos que se percorra totalmente sozinho na vida. Assim, gostaria de endereçar os meus maiores agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho e de todo o percurso feito até aqui.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, a todos os colegas, professores e pessoal não docente, quero agradecer pelo brio em primar pela excelência e qualidade, sempre com as relações interpessoais em mente, numa comunhão de valores que levarei para o resto da minha vida.

Ao Professor Vítor Martins Augusto, agradeço as palavras de incentivo que, desde a primeira aula, me dão força para continuar a querer mais e melhor. Agradeço a oportunidade de realizar o estágio curricular e a dissertação na *Norcam* e também o apoio dado, não só ao trabalho, como também a todos os aspetos envolventes.

Agradeço à *Norcam*, na pessoa do seu Diretor, o Engenheiro Pedro Vieira de Castro, a oportunidade de desenvolver este trabalho.

Deixo também um agradecimento ao Engenheiro Américo Nunes e à *Azemoldes* pelo suporte prestado e a disponibilidade demonstrada em colaborar. Ao Engenheiro David Alves, uma palavra de muito apreço pelo interesse, paciência, aconselhamento e ajuda que deu na realização do trabalho conjunto.

Aos velhos amigos, sempre presentes, pelo apoio e amizade, especialmente pelo contributo num crescimento que me levou à Faculdade de Engenharia.

Ao Orfeão Universitário do Porto, agradeço os ensinamentos de valores maiores. A importância do trabalho e esforço em prol de algo que nos transcende. A importância da vida associativa para o desenvolvimento enquanto ser humano. A importância da Universidade do Porto. Agradeço os grandes amigos que levei e as pessoas excecionais que pude conhecer.

Aos novos amigos, agradeço a ajuda nos momentos decisivos do meu percurso. Agradeço os conselhos e a motivação que também me trouxeram até aqui.

Agradeço à Diana a paciência, a companhia nas longas maratonas de estudo e a persistência incansável na ajuda para o alcance deste objetivo. Sem ti, o caminho teria sido mais duro.

Aos meus padrinhos Odete e Nuno. Aos meus avós António, Mário, Lucília e Olga, bússolas morais: as pessoas mais admiráveis que conheci.

Ao meu Pai, as horas de trabalho e esforço. Agradeço o exemplo, a inspiração e a atenção para o que a vida tem de mais sublime. À Li, pela amizade e carinho de sempre.

Às minhas irmãs, pela presença diária, paciência, aconselhamento e esforço feitos nesta fase desafiadora das nossas vidas.

À minha Mãe, para quem não chegam todos os agradecimentos, por me ter tornado a pessoa que sou hoje.

Índice

Resumo.....	iii
Palavras-Chave	iii
Abstract.....	iv
Keywords	iv
Agradecimentos	v
Índice de Figuras	vii
Lista de abreviaturas e símbolos.....	x
1. Introdução	1
1.1. Contextualização da Dissertação e Motivação.....	1
1.2. História e posição atual do setor	1
1.3. Produção e Exportação.....	2
1.3.1. Indústrias fornecidas pelos moldes portugueses	4
1.4. Objetivos do trabalho	5
1.5. Estrutura da Dissertação	5
2. Conceção e Construção de Moldes.....	6
2.1. Injeção de plástico.....	6
2.1.1. Materiais – Polímeros.....	6
2.1.2. História da injeção.....	10
2.1.3. Equipamento, Processo e Ciclo Produtivo	11
2.1.4. Importância dos parâmetros do processo	14
2.2. Molde para injeção de plástico	15
2.2.1. Tipologia de moldes	18
2.2.1.1. Moldes de duas placas	21
2.2.1.2. Moldes de três placas.....	21
2.2.1.3. Moldes de canais quentes.....	22
2.3. Projeto do molde.....	23
2.4. Construção do molde	24
2.5. Ensaio e ajustes ao molde	25
2.6. Utilidade da aplicação de <i>software</i> CAE	26
3. <i>Moldflow</i>	27
3.1. <i>Workflow</i> e princípios da análise	29
3.2. Simulação de enchimento e compactação (<i>Fill+Pack</i>)	31
3.3. Simulação de arrefecimento (<i>Cool</i>)	33
3.4. Simulação de empeno (<i>Warp</i>)	35
4. Trabalho prático desenvolvido	39
4.1. Apresentação da NORCAM	39
4.2. Apresentação da Azemoldes.....	39
4.3. Estudo da peça	40
4.3.1. Diagnóstico de espessura da malha	40
4.3.2. Material e parâmetros do processo	40
4.3.3. Resultados da análise do Enchimento e Compactação.....	41
4.3.4. Preparação da análise de arrefecimento	48
4.3.5. Resultados da análise de arrefecimento	48
4.3.6. Resultados da análise de empeno	51
5. Implementação do <i>Moldflow</i>	52
5.1. Viabilidade financeira	52
6. Análise SWOT - “Implementação do <i>Moldflow</i> na Azemoldes”	55
7. Conclusões.....	58
8. Perspetivas para trabalhos futuros	59
9. Bibliografia	60

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de tecnologia de injeção e moldação utilizada nos anos 40 e 50 na Europa.	2
Figura 2 – Produção e Exportação do setor em milhões de euros [3]	3
Figura 3 – Contributo relativo de países e regiões económicas para o total de exportações do setor [3]	3
Figura 4 – Contributo relativo das indústrias servidas pelo setor [3]	4
Figura 5 – Representação esquemática de estrutura linear (a), ramificada (b), reticulada (c) e em rede (d). Cada círculo designa uma unidade repetitiva [4] ...	7
Figura 6 – (a) Estrutura polimérica amorfa; (b) estrutura polimérica cristalina [4]	8
Figura 7 – Aplicações de termoplásticos de grande consumo [7]	9
Figura 8 – Aplicações de termoplásticos intermédios [8]	9
Figura 9 – Aplicações de termoplásticos de engenharia na indústria automóvel [9]	10
Figura 10 – Aplicações de termoplásticos de alta <i>performance</i> na indústria aeronáutica [10]	10
Figura 11 – Parafuso sem-fim.....	11
Figura 12 – Máquina de injeção de plástico e os seus componentes [14]	12
Figura 13 – Fecho do molde [14]	12
Figura 14 – Enchimento [14]	13
Figura 15 – (a) Sistema de arrefecimento; (b) Pressurização e arrefecimento [14]	13
Figura 16 – Arrefecimento e plasticização [14].....	13
Figura 17 – Abertura do molde e final do ciclo [14]	13
Figura 18 – Tempo relativo das etapas para o tempo total de ciclo [14]	14
Figura 19 – Janela de processo da influência de pressão vs temperatura [14]	15
Figura 20 – Configuração básica de um molde [14]	16
Figura 21 – Sistema de alimentação genérico de um molde [14]	17
Figura 22 – Vantagens de um sistema de arrefecimento eficiente e adequado [14]	18
Figura 23 – Elementos comuns aos diversos tipos de molde [6].....	19
Figura 24 – Esquema de secção transversal de molde de duas placas [6]	21
Figura 25 – Esquema de secção transversal de molde de três placas [6].....	22
Figura 26 – Esquema de secção transversal de molde de canais quentes [6]	22
Figura 27 – Esquema ilustrativo da utilidade da tecnologia CAE para a indústria de moldes. [24].....	27
Figura 28 – Interface do utilizador, <i>Sinergy</i>	28
Figura 29 – Fluxograma do procedimento para estudo de uma peça [16].....	29
Figura 30 – Fluxo laminar (a) e fluxo turbulento (b) [14]	34
Figura 31 – Indicação da interface plástico e metal do molde [17]	35
Figura 32 – Arrefecimento diferencial [17].....	37
Figura 33 – Formas do empeno devido a diferenciais de contração [17]	37
Figura 34 – Exemplo de efeitos de orientação [17]	38
Figura 35 – Diagnóstico de espessura da malha; lado da cavidade (a) e lado do macho (b).....	40
Figura 36 – Perfil de compactação. Gráfico (a) e controlo no <i>software</i> (b)	41

Figura 37 – Enchimento. Efeito <i>racetrack</i> (a) e hesitação no <i>boss</i> (b).....	42
Figura 38 – Gráfico de pressão vs tempo em vários nós; (a) sistema de alimentação alterado no estudo subcontratado.....	42
Figura 39 – Força de fecho vs tempo	43
Figura 40 – Temperatura na frente de fluxo. Pormenor do <i>boss</i> para montagem (a)	44
Figura 41 – Fração de camada solidificada no final do enchimento. Pormenor do <i>boss</i> para montagem próximo do ataque (a).....	44
Figura 42 – Contração volumétrica na peça. <i>Boss</i> próximo do ataque (a) e <i>boss</i> no final da peça (b)	45
Figura 43 – Contração volumétrica na peça de acordo com diferentes percentagens	46
Figura 44 – Contração volumétrica média	46
Figura 45 – Resultado prisões de ar.....	47
Figura 46 – Ângulos de convergência das frentes de fluxo. Resultado linhas de soldadura	47
Figura 47 – Peça e sistema de arrefecimento representados por malha, antes de simulação.....	48
Figura 48 – Fluxo (a) e número de Reynolds (b) do circuito de refrigeração	49
Figura 49 – Temperatura do líquido arrefecedor no circuito de refrigeração	49
Figura 50 – Temperatura do metal dos canais de refrigeração	49
Figura 51 – Temperatura do molde.	50
Figura 52 – Tempo em que diferentes zonas atingem a temperatura de extração.	50
Figura 53 – Valores de deflexão – todos os efeitos.....	51
Figura A 1 – Prisões de ar em simulação <i>Moldflow Adviser</i>	62
Figura A 2 – Ilustração de peça que parte por fragilização.....	62
Figura A 3 – Exemplo de queimaduras	62
Figura A 4 – Ilustração de variação dimensional.....	62
Figura A 5 – Formação de uma hesitação.	63
Figura A 6 – Exemplo de rebarbas	63
Figura A 7 – Abatimento superficial e vazios.....	63
Figura A 8 – Formação de linhas de soldadura.	64
Figura B 1 – Questionário para as empresas de moldes, p. 1.....	65
Figura B 2 – Questionário para as empresas de moldes, p. 2.....	66
Figura B 3 – Questionário para as empresas de moldes, p. 3.....	67
Figura C 1 – Elementos finitos em <i>Moldflow</i> - (a) viga; (b) triângulo e (c) tetraedro.	68
Figura C 2 – Modo de definição das malhas <i>Moldflow</i>	69
Figura D 1 – Propriedades térmicas do conjunto material/molde	70
Figura D 2 – Viscosidade do material	70
Figura D 3 – Volume específico vs temperatura do material	71

Figura E 1 – Importação do modelo com curvas IGES	72
Figura E 2 – Reparação e edição das curvas IGES	72
Figura E 3 – Reposicionamento das curvas que representam o sistema de arrefecimento.....	73
Figura E 4 – (a) dimensionamento dos canais de refrigeração; (b) parametrização do malhamento	73
Figura E 5 – Edição da malha	74
Figura E 6 – Definição dos <i>inlets</i> do sistema de refrigeração	74
Figura E 7 – Diagnóstico da razão largura/diâmetro das vigas	75
Figura F 1 – Modelo CAD do molde fornecido pela <i>Azemoldes</i> para retirar as dimensões a aplicar no <i>Moldflow</i>	76
Figura F 2 – Dimensionamento da malha do molde	76
Figura F 3 – Malha do molde concluída	76
Figura F 4 – Parâmetros da simulação <i>Cool + Fill&Pack + Warp</i>	77
Figura G 1 – Deflexão, todos os efeitos. Componente X	78
Figura G 2 – Deflexão, todos os efeitos. Componente Y	78
Figura G 3 – Deflexão, todos os efeitos. Componente Z	79
Figura G 4 – Contração diferencial, todos os componentes	79
Figura G 5 – Arrefecimento diferencial, todos os componentes	80
Figura H 1 – Estudos feitos para otimizar o estudo final	82
Tabela 1 – Tipos de fluxo e respetivos números de Reynolds para a água [14]	34
Tabela 2 – Parâmetros do processo	41
Tabela 3 – Parâmetros dos canais de arrefecimento	48
Tabela 4 – Custos associados ao primeiro ano de investimento	52
Tabela 5 – Possível redução de custos (em Euro) na realização de ensaios	53
Tabela 6 – Faturação e lucro derivados da implementação de <i>Moldflow</i>	54
Tabela 7 - Análise SWOT da empresa <i>Azemoldes</i>	56
Tabela C 1 – Características das malhas usadas na análise <i>Moldflow</i>	69
Tabela H 1 – Cálculos do tempo de simulação e análise da peça.....	81
Equação 1.....	33

Lista de abreviaturas e símbolos

ρ – Densidade do líquido	mm – Milímetro(s)
η – Viscosidade dinâmica do líquido arrefecedor	MPa – Megapascal
\emptyset – Diâmetro	PA – Poliamida
$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius	PAEK – Poliariletercetonas
3D – Tridimensional(is)	PC – Policarbonato
ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno	PE – polietileno
CAD – <i>Computer-aided Design</i>	PEI – Polieterimida
CAE – <i>Computer-aided Engineering</i>	PET – Politereftalato de etileno
CAM – <i>Computer-aided Manufacturing</i>	PP – Polipropileno
CEFAMOL – Associação Nacional da Indústria de Moldes	PS – Polistireno
CNC – <i>Computer Numeric Control</i> (controlo numérico computadorizado)	PUR – Poliuretano
d – Diâmetro do canal de refrigeração	PVC – Policloreto de vinilo
EUA – Estados Unidos da América	PVT – Pressão, volume, temperatura
FEA – <i>Finite Element Analysis</i> (análise por elementos finitos)	r – Densidade do líquido
h – Viscosidade dinâmica do líquido arrefecedor	Re – Número de Reynolds
HIPS – Polistireno de alto impacto	s – Segundo(s)
IGES – <i>Initial Graphics Exchange Specification</i>	SWOT – <i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
l – Litro(s)	T – Temperatura
MF – <i>Moldflow</i>	Tg – Temperatura de transição vítrea
min – Minuto(s)	ton – Tonelada(s)
	U – Velocidade média do líquido
	UV – Ultravioleta
	vs – <i>versus</i> (face a)
	XL – <i>Extra Large</i> (extra-grande)
	XS – <i>Extra Small</i> (extra-pequeno)

Nota: Autodesk® Moldflow®, Moldflow® Insight® (ou simplesmente Insight®) e Sinergy® são marcas registadas e propriedade intelectual da Autodesk®, sendo doravante apresentadas sem o símbolo ®.

1. Introdução

1.1. Contextualização da Dissertação e Motivação

A indústria portuguesa de moldes é um interveniente septuagenário de peso na economia nacional, com raízes e tradições conservadas no tempo, mas com uma aposta constante na inovação tecnológica, na qualidade e na competitividade internacional.

A melhoria e inovação constantes têm um impacto positivo neste fator, determinante para a manutenção do fornecimento de clientes de peso no panorama económico internacional, especialmente os fabricantes de automóveis. Assim, torna-se premente procurar extrair o máximo de eficácia nos processos, desde a conceção ao fabrico, passando pelo desenvolvimento e controlo de qualidade. Deste modo, a inovação tecnológica pela aposta na antecipação de problemas ou dificuldades, através do estudo heurístico acompanhado de experiência e conhecimento prático, apresenta-se como uma via interessante a explorar.

No âmbito da elaboração da presente Dissertação de Mestrado para conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, surgiu a oportunidade de explorar as potencialidades de *software* CAE, nomeadamente o *Autodesk Moldflow Insight 2021*, para discernir as possíveis vantagens que a utilização interna do mesmo trará à indústria portuguesa de moldes e esmiuçar as razões pelas quais este recurso não é ainda generalizado.

Assim, dada a situação pandémica atual, o trabalho foi desenvolvido essencialmente em regime de teletrabalho, através de uma licença para o *software* cedida pela «NORCAM». Em primeiro lugar, foram inquiridas 43 empresas do setor através de um questionário enviado por correio eletrónico, numa tentativa de aferir os principais motivos para a escassez de utilização de simulação CAE. Este inquérito teve fraca adesão. Depois, procedeu-se ao estudo de um caso prático, em colaboração com a *Azemoldes*, que gentilmente cedeu o modelo CAD de um apoio de farolim de um *Renault Zoe*.

1.2. História e posição atual do setor

Remonta a 1945 a produção do primeiro molde para injeção de plástico, numa pequena empresa de moldes, na Marinha Grande, fundada apenas dois anos antes, por Aníbal H. Abrantes e irmão. Foi nas cidades com forte associação à indústria vidreira até então – Marinha Grande e Oliveira de Azeméis – que outras empresas iniciaram a produção de moldes para injeção de plásticos. Na sequência do desenvolvimento de métodos revolucionários de injeção de plásticos (como o parafuso sem-fim) e da elevada procura de peças plásticas, amplificada pela II Guerra Mundial, assistiu-se a um influxo de novas tecnologias oriundas do estrangeiro. Assim, a era da exportação inaugurou-se em 1955, com a venda de moldes à Grã-Bretanha. O crescimento do setor continuou, e, nos inícios

da década de 1980, a exportação já era feita para mais de 50 países. Nessa altura – e apenas na região geográfica da Marinha Grande – operavam 54 empresas, com um número total de colaboradores da rondando os 2 000 [2].

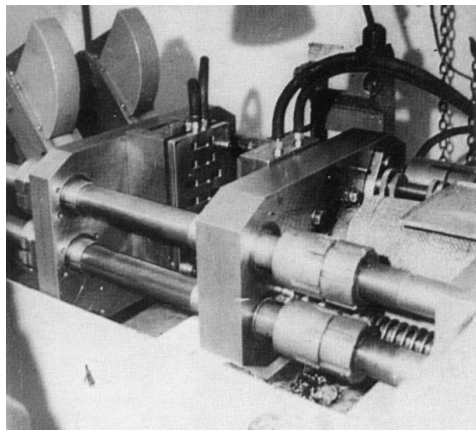


Figura 1 – Exemplo de tecnologia de injeção e moldação utilizada nos anos 40 e 50 na Europa. LEGO®, na Dinamarca em 1949 [1]

A indústria de moldes, já especializada e diversificada muito para além da produção apenas para a tradicional injeção de plástico, continuou o seu crescimento. O desenvolvimento tecnológico, a melhoria contínua da produção e qualidade e o investimento quer em equipamento moderno quer na formação de técnicos profissionalizados são apenas alguns dos fatores que elevam este setor de atividade económica no contexto mundial [2].

Atualmente, a indústria ocupa um lugar de destaque crescente a nível económico, consolidado e sustentado pela união e esforço empresarial e por entidades como a CEFAMOL – Associação Nacional da Indústria de Moldes, que promovem a imagem externa do setor. Assim, entre a lista de principais fabricantes de moldes para injeção de plástico, Portugal ocupa a 8.^a posição ao nível mundial e a 3.^a posição a nível europeu [3].

Distribuídas entre a Marinha Grande e Oliveira de Azeméis, são 536 as empresas, principalmente de pequena e média dimensão, totalizando aproximadamente 11 000 trabalhadores, que concebem e fabricam moldes e ferramentas especiais da mais alta qualidade, dos quais 90% são exportados [3].

De modo a ilustrar o estado atual do setor, irão ser abordados em seguida alguns dos indicadores providenciados pela CEFAMOL no documento *REPORT '20*, nomeadamente produção; exportação e indústrias fornecidas pela Indústria.

1.3. Produção e Exportação

Os indicadores publicados pela CEFAMOL sugerem que os construtores de moldes tenham faturado, em 2019, cerca de 682 milhões de Euro, tendo sido exportados produtos no valor

de 614 milhões de Euro (valor provisório). Assim, o ano passado (quarto melhor de sempre) demonstra a resposta positiva dada pela indústria à concorrência internacional e uma acomodação excelente aos requisitos dos clientes. Exportou-se 90% da produção para 84 países, principalmente Espanha, Alemanha, França, República Checa, Polónia e Estados Unidos da América. Estamos, assim, perante um quadro representativo do cariz inovador da indústria, ao nível dos mercados e tecnologias [3].

A Figura 2 apresenta um gráfico dos valores de produção em contraste com a exportação do setor, na última década.

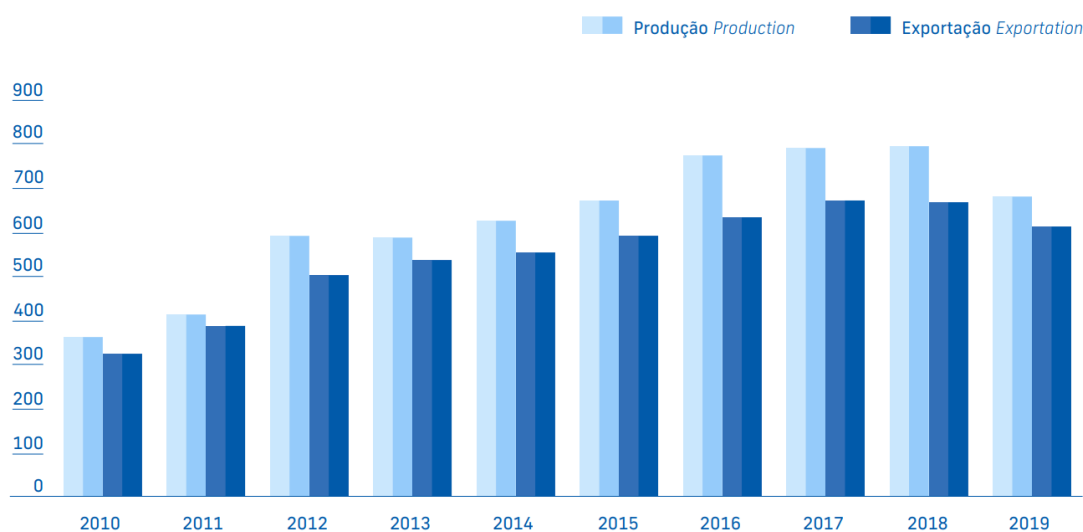


Figura 2 – Produção e Exportação do setor em milhões de euros [3]

A análise do gráfico da Figura 2 permite verificar a tendência exportadora do setor, nunca inferior a 75% da produção. Desde a crise económica que atingiu o país em 2007, houve um natural crescimento económico que se deveu também ao desenvolvimento da indústria de injeção de plásticos, consolidado pelo aumento da cadeia de valor dos produtores de moldes [3]. A Figura 3 realça o contributo das diversas regiões económicas para a conjuntura exportadora do setor.



Figura 3 – Contributo relativo de países e regiões económicas para o total de exportações do setor [3]

O relatório de 2020 elaborado pela CEFAMOL refere que, em termos de exportações do setor nacional, o conjunto da União Europeia mantém a tendência da última década – cerca de 80% do total de exportações do total da produção. Por outro lado, tem-se registado um aumento da procura junto dos construtores de moldes portugueses por parte da região da América do Norte – isto é, EUA e Canadá – consequência dos *ratings* positivos da economia portuguesa, que atraíram investimento e confiança [3].

1.3.1. Indústrias fornecidas pelos moldes portugueses

São várias as indústrias que utilizam como ferramentas os moldes fabricados em Portugal. Entre elas, a indústria automóvel avulta como o grande propulsor económico do setor, crescendo de 14% da produção para 82%, de 1991 a 2018. Por outro lado, a presença do setor é sentida no serviço a outros produtos que têm adquirido relevância no panorama mundial, como são os dispositivos médicos e a indústria aeronáutica. A CEFAMOL realça ainda o crescimento sustentado da área das embalagens, que constitui atualmente 8% da produção de moldes.

A Figura 4 apresenta o contributo relativo das indústrias servidas pelos moldes nacionais.

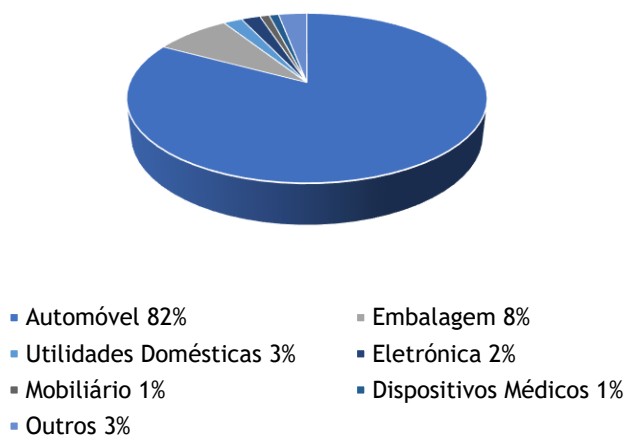


Figura 4 – Contributo relativo das indústrias servidas pelo setor [3]

A indústria portuguesa de moldes é, assim, um setor em franca expansão sustentada pela experiência e qualidade, conquistando posições importantes no mercado internacional, estendendo a sua atividade, em menos de um século, aos principais centros de produção da Europa e do Norte do continente americano, multiplicando por um fator de 8 a sua produção nas últimas três décadas, em particular no setor automóvel, graças à constante inovação e procura de novos nichos de mercado em indústrias emergentes.

1.4. Objetivos do trabalho

A indústria portuguesa de moldes ocupa, como vimos, um lugar de destaque, não só como líder no fabrico de ferramentas de alta qualidade – como são os moldes –, mas também no contributo que dá para o desenvolvimento de produtos de diferentes áreas, essenciais para o avanço da sociedade atual.

Tendo em conta o panorama descrito no ponto anterior, onde se constata a ausência de recurso, a nível interno, por parte do setor, a ferramentas CAE, foram definidos quatro passos principais para se atingir o principal objetivo da dissertação – a aplicação do *Moldflow Insight* para a indústria de moldes:

1. inquérito a 43 empresas de moldes na região de Oliveira de Azeméis sobre a utilização de ferramentas CAE, ensaios de moldes e compra de estudos *Moldflow*;
2. realização de estudo *Moldflow* para uma peça da *Azemoldes*: farolim traseiro de um Renault Zoe;
3. análise dos benefícios financeiros da implementação do *Moldflow* para o setor, com base na realidade da *Azemoldes*;
4. análise SWOT da implementação de *Moldflow* na *Azemoldes*.

1.5. Estrutura da Dissertação

Decorrente dos objetivos acima enunciados, a presente dissertação foi organizada em cinco capítulos, que abordam os seguintes tópicos:

- Capítulo 1 – Contextualização, motivação e objetivos do trabalho;
- Capítulo 2 – Introdução teórica sobre a conceção e construção de moldes, contextualizando os materiais, equipamento e ciclo produtivo tradicionalmente associados à injeção de plásticos;
- Capítulo 3 – Apresentação do *Moldflow* e principais funcionalidades;
- Capítulo 4 – Apresentação dos resultados do estudo *Moldflow* elaborado;
- Capítulo 5 – Identificação e discussão das perspetivas de custos e poupanças decorrentes da implementação do *Moldflow* para a indústria de moldes;
- Capítulo 6 – Análise SWOT e discussão sobre a implementação do *Moldflow* na *Azemoldes*;
- Capítulo 7 – Conclusões sobre o trabalho desenvolvido;
- Capítulo 8 – Apresentação de perspetivas para o futuro.

No final do trabalho, seguem as referências bibliográficas e anexos relevantes.

2. Conceção e Construção de Moldes

Os moldes são ferramentas que se aplicam aos mais variados métodos de conformação de materiais, servindo a moldação de metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. Assim, importa contextualizar a conceção e construção desta ferramenta no processo que irá depois integrar – no caso vertente, a injeção de plásticos. Por este motivo, neste capítulo será abordado primeiramente o processo de injeção – materiais conformados, máquina de injeção, ciclo produtivo e principais defeitos da peça. Depois, será possível focar a conceção e construção de moldes.

Ao longo deste trabalho irá ser utilizada a expressão «injeção de plásticos», que é a expressão de referência mundial, a nível comercial e industrial, para a conformação por injeção dos materiais poliméricos, ou de matriz polimérica.

Assim, segundo a sugestão do Orientador, e tendo a consciência de que a denominação mais correta e rigorosa para um trabalho de cariz académico como o que se segue é «polímero», optámos pelo termo «plástico», já que:

- a) o presente trabalho é uma dissertação no meio industrial, no qual é muito raro o emprego da expressão “polímero”;
- b) existem dissertações e outros trabalhos científicos em que este termo é empregue e
- c) é o termo utilizado pelos autores do *software* e da restante bibliografia.

Assim, à exceção da secção «2.1.1. Injeção de plástico

Materiais – Polímeros», por se tratar de uma revisão bibliográfica dos materiais e das suas propriedades, utilizar-se-á preferencialmente ao longo do presente documento a expressão «injeção de plástico».

2.1. Injeção de plástico

2.1.1. Materiais – Polímeros

Os materiais poliméricos consistem em combinações de átomos de carbono que reagem com oxigénio, hidrogénio e azoto, entre outros elementos orgânicos e inorgânicos [4]. Podem ser transformados do estado sólido para o líquido e conformados para as mais variadas formas através da aplicação de pressão e temperatura. Os polímeros são agregados de estruturas moleculares, ou monómeros, em cadeia. As características físicas de um polímero dependem não só do seu peso ou forma molecular, mas também das diferenças estruturais das cadeias moleculares [4]. A síntese de polímeros permite controlar as diversas possibilidades de estruturas moleculares: lineares, ramificadas,

reticuladas e em rede, podendo ainda assumir várias configurações isométricas. A Figura 5 esquematiza as possibilidades estruturais referidas.

Os monómeros ligam-se topo a topo numa cadeia única em polímeros lineares. As cadeias são longas e flexíveis. Nos polímeros ramificados, as cadeias laterais, que ocorrem por reações secundárias durante a polimerização, estão ligadas às principais. Os polímeros reticulados caracterizam-se por cadeias adjacentes, unidas em vários pontos por átomos ou moléculas que formam ligações covalentes com as cadeias. Quando há três ou mais ligações covalentes ativas, os monómeros multifuncionais formam uma rede tridimensional. Geralmente, os polímeros consistem em combinações destas estruturas, não se limitando a um tipo exclusivo [4].

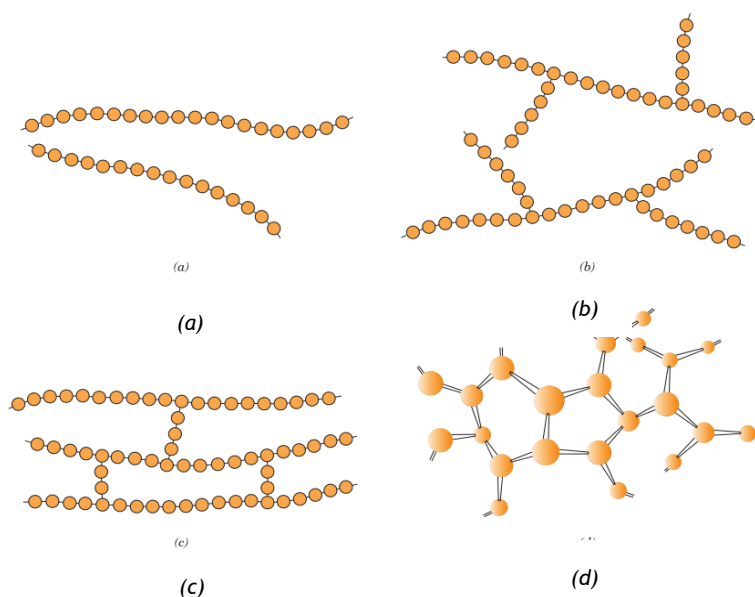


Figura 5 – Representação esquemática de estrutura linear (a), ramificada (b), reticulada (c) e em rede (d). Cada círculo designa uma unidade repetitiva [4]

Os polímeros apresentam-se em dois estados diferentes: um em que os compostos poliméricos de alta densidade se encontram arranjados em estrutura cristalina (polímeros cristalinos); outro, na forma de cadeias moleculares flexíveis entrelaçadas (polímeros amorfos) [5]. A Figura 6 ilustra as diferenças entre as estruturas descritas. No entanto, não existem materiais poliméricos que se encontrem organizados apenas em estruturas cristalinas, antes por uma mistura de secções cristalinas e amorfas.

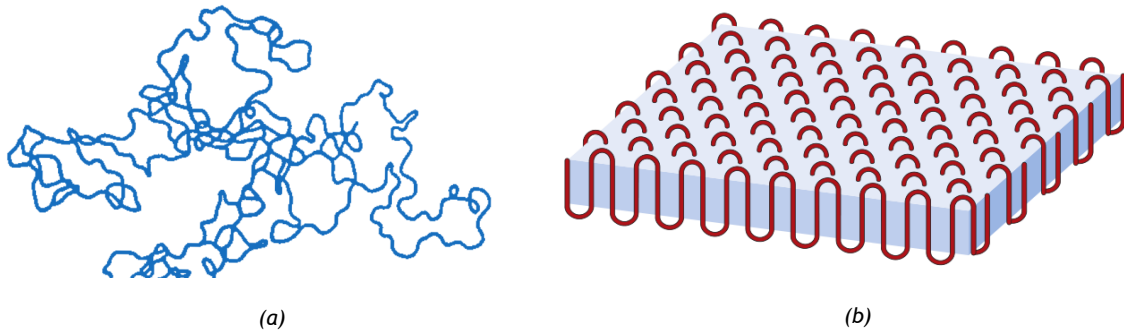


Figura 6 – (a) Estrutura polimérica amorfa; (b) estrutura polimérica cristalina [4]

Existem diversas famílias de polímeros, cada uma com as suas características e propriedades únicas. A maioria dos polímeros enquadra-se em três grupos: os elastómeros, os termoendurecíveis e os termoplásticos.

Os elastómeros são produzidos com base em borracha natural ou sintética, que é inicialmente um termoplástico misturado com carbono e enxofre. Durante a moldação, o material sofre reticulação pelo enxofre que interliga as cadeias poliméricas. Tipicamente, os elastómeros têm baixo módulo de Young (não são rígidos) e são muito elásticos, podendo chegar a esticar até ao dobro (ou mais) do comprimento inicial, retomando, depois da aplicação de força, a sua forma e tamanho iniciais. Este tipo de material é usado como substituto das borrachas e pode ainda ser usado como aditivo para melhorar a resistência ao choque de termoplásticos rígidos [5].

Nos polímeros termoendurecíveis, durante a polimerização, dá-se uma reação que forma ligações químicas entre as cadeias reticuladas e a rede de cadeias longas. No final do processo, a estrutura apresenta-se como uma rede tridimensional de cadeias poliméricas lineares que se ligam entre si. O material endurece e pode ser aquecido sem que sejam desfeitas algumas das ligações, mantendo o estado sólido a temperaturas relativamente altas [5]. Esta transformação é irreversível; como tal, os materiais não podem ser reprocessados e a reciclagem de material é muito limitada. São comercializados sob a forma de resinas, pós e misturas líquidas de monómeros ou compostos para moldação parcialmente polimerizados. Nesta última condição, é possível conformar os materiais termoendurecíveis com ou sem aplicação de pressão, sendo polimerizados quimicamente ou através de calor, durante o processo [5].

Os termoplásticos são longas cadeias de moléculas lineares ou reticuladas que podem ter a si associadas outras cadeias do mesmo material ou de outras partículas poliméricas. Os termoplásticos têm especial relevância para a injeção, uma vez que podem ser repetidamente fundidos sob pressão, arrefecidos e conformados para uma forma desejada. Geralmente, são comercializados sob a forma de *pellets*, grânulos ou pós. Durante o seu processamento não existem alterações de natureza química [5].

Os termoplásticos encontram-se subdivididos em quatro grupos, de acordo com o desempenho das propriedades mecânicas, físicas e químicas requerido para cada aplicação [6].

O primeiro grupo é o dos termoplásticos de grande consumo. Estes possuem uma ampla gama de aplicações, a baixo custo e com propriedades limitadas. Nele se incluem o polistireno (PS), o polietileno (PE) e policloreto de vinilo (PVC), nomeadamente [6].



Figura 7 – Aplicações de termoplásticos de grande consumo [7]

Ao segundo, pertencem os designados termoplásticos intermédios. Estes possuem propriedades mecânicas, térmicas, químicas e elétricas superiores às apresentadas pelos do grupo anterior. Introduzem-se alterações às propriedades mecânicas específicas destes materiais pela adição de catiões à matriz de base, a qual mantém as suas propriedades. Este grupo inclui os acrílicos, o polistireno de alto impacto (HIPS), o polipropileno (PP), o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) e poliuretano (PUR), entre outros [6].



Figura 8 – Aplicações de termoplásticos intermédios [8]

Os termoplásticos de engenharia constituem o terceiro grupo. As propriedades mecânicas mínimas exigidas, genericamente, são não inferiores a 48 MPa, no caso da resistência à tração, e 2414 MPa, para o módulo de elasticidade. As estruturas destes polímeros são pouco modificadas, sendo a obtenção das propriedades necessárias ao desempenho esperado para cada aplicação feita através da introdução de aditivos. Estes aditivos podem desempenhar funções a diferentes níveis: reforço estrutural (como as fibras de vidro ou os minerais), estabilizadores de temperatura ou raios UV, retardadores de chama, entre outras. Os termoplásticos de engenharia incluem, a título de exemplo, as poliamidas (nylon, PA), o policarbonato (PC) e o politereftalato de etileno (PET) [6].



Figura 9 – Aplicações de termoplásticos de engenharia na indústria automóvel [9]

O quarto e último grupo de termoplásticos são os de alta *performance*. Além de apresentarem os maiores valores de resistência máxima dentro dos termoplásticos, estes materiais mantêm o desempenho mecânico a temperaturas elevadas, levando a que as peças por eles compostas tenham um maior tempo de serviço. Adicionalmente, conseguem manter determinadas propriedades químicas, como a resistência à corrosão, mesmo quando expostos a correntes elétricas ou a produtos corrosivos. São termoplásticos de alta *performance* o nylon de alta temperatura (PA), os fluoropolímeros, a polieterimida (PEI), as poliariletercetonas (PAEK), etc. [6].



Figura 10 – Aplicações de termoplásticos de alta *performance* na indústria aeronáutica [10]

2.1.2. História da injeção

A injeção de plásticos é um processo cujos produtos se encontram omnipresentes no quotidiano contemporâneo. Dos dispositivos eletrónicos e respetivos acessórios aos automóveis, passando pelo material de escritório e equipamentos médicos, praticamente todos os objetos que manuseamos possuem componentes poliméricos assim conformados.

Esta realidade deve-se ao facto de a injeção de polímeros ser o processo mais comum e o mais generalizado no que ao processamento de polímeros diz respeito.

As primeiras máquinas de injeção foram inspiradas no vazamento sob pressão de metais — *pressure die casting*. O primeiro registo de patente de uma máquina com estas características foi feito nos Estados Unidos, em 1872: uma máquina para conformação de celulóide. Poucos foram os desenvolvimentos nas décadas seguintes. Por volta de 1920, na Alemanha, foram desenvolvidas as primeiras máquinas de injeção totalmente manuais, que requeriam a operação de manetes para aplicação de pressão através de um êmbolo [11]. Uma década mais tarde, foram introduzidas máquinas dotadas de sistemas de pressão hidráulica. Posteriormente, em 1948, as novas gerações de máquinas passaram a usar um parafuso sem-fim (Figura 11), o qual veio permitir um melhor controlo do volume a injetar e da homogeneização (mistura do plástico, ligantes e aditivos) e, conseqüentemente, a fusão de maiores volumes de plástico e a produção de peças de maiores dimensões [12].



Figura 11 – Parafuso sem-fim

Os avanços tecnológicos mais recentes transformaram a injeção de plásticos num processo mais versátil, capaz de produzir peças com geometrias, tolerâncias e tamanhos mais variados, permitindo obter um melhor controlo do processo graças aos avanços na engenharia eletrónica, ao surgimento de várias soluções de parafusos sem-fim, e até de máquinas com sistemas de funcionamento totalmente elétrico [13].

2.1.3. Equipamento, Processo e Ciclo Produtivo

A injeção de plástico é um processo cíclico de conformação de polímeros para a forma desejada numa cavidade, através de aplicação de pressão. Atinge-se a forma através do arrefecimento, no caso dos termoplásticos, ou por reação química nos termoendurecíveis. É uma técnica muito comum, extremamente versátil e capaz de produzir peças com excelente tolerância dimensional. Requer muito poucas, ou nenhuma, operações de acabamento e montagem. Para além dos termoplásticos e termoendurecíveis, são utilizadas fibras, cerâmicos e pós metálicos como ligantes juntamente com os polímeros [14]. A Figura 12 ilustra o equipamento base de uma máquina de injeção.

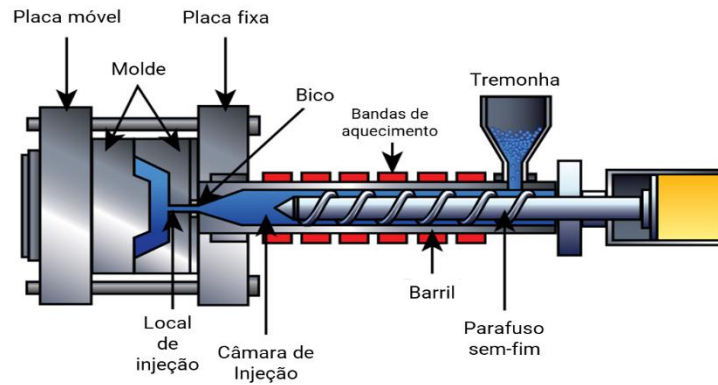


Figura 12 – Máquina de injeção de plástico e os seus componentes [14]

O processo inicia-se com a deposição do termoplástico sob a forma de *pellets* na tremonha que, devido à ação da gravidade, irá alimentar o barril onde se encontra o parafuso sem-fim. O barril que suporta o parafuso que vai plasticizar o material é aquecido pelas bandas de aquecimento elétricas. O parafuso sem-fim vai transportar, fundir e injetar o material. O bico liga o barril ao local de injeção do molde, ou gito, e forma um selo entre o barril e o molde. O bico deve estar à temperatura de fusão (ou ligeiramente abaixo) e quando este está cheio e o parafuso empurra o material o raio do bico é coincidente com o do gito. Por fim, o material entra no molde. Posteriormente, a peça é arrefecida pelos canais de arrefecimento e removida [14].

Sendo a injeção de plástico um processo cíclico, a compreensão dos passos envolvidos na transformação da matéria-prima até à obtenção do produto final são essenciais. A primeira parte do ciclo é o enchimento. Fechando o molde, o parafuso inicia o movimento e o calor das bandas de aquecimento provoca a fusão do material (Figura 13).

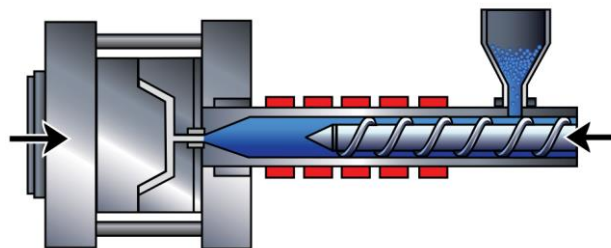


Figura 13 – Fecho do molde [14]

O parafuso movimenta-se rapidamente, o que levará ao total enchimento das cavidades moldantes. Inicia-se então a segunda parte do ciclo – a pressurização. A uma velocidade mais lenta, o parafuso continua a exercer pressão, até atingir o limite de avanço (Figura 14).

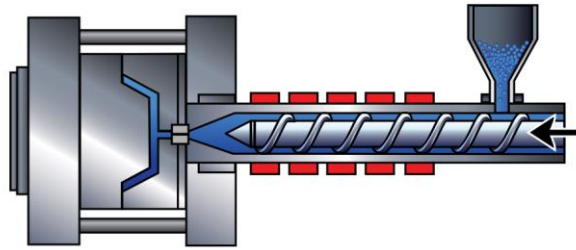


Figura 14 – Enchimento [14]

O parafuso atinge a distância máxima de movimento. Assim, dá-se o arrefecimento, que é a terceira fase, a mais longa do ciclo produtivo. O fluido circulante circula no interior do molde, baixando a temperatura (Figura 15). À medida que se dá o arrefecimento, o parafuso retrai-se e plasticiza o material. Assim, vai acumular o material fundido, em preparação para o próximo ciclo (Figura 16). Concluído o arrefecimento, o molde abre e a peça é ejetada, já em estado sólido, podendo dar-se início ao próximo ciclo (Figura 17).

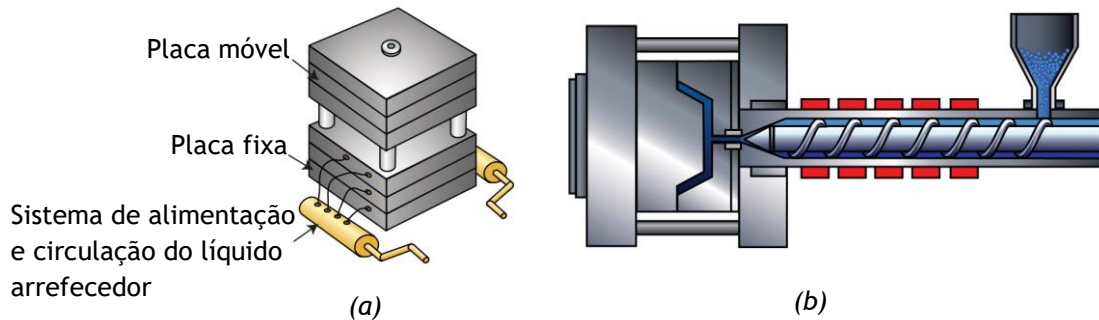


Figura 15 – (a) Sistema de arrefecimento; (b) Pressurização e arrefecimento [14]

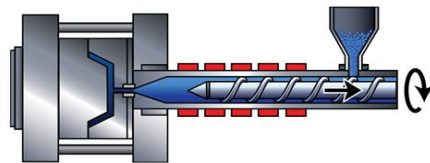


Figura 16 – Arrefecimento e plasticização [14]

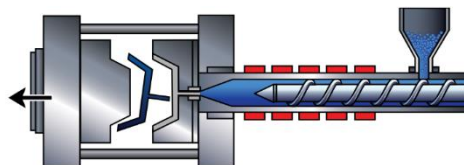


Figura 17 – Abertura do molde e final do ciclo [14]

O tempo de todo este processo (tempo de ciclo) é, tipicamente, uma característica do processo que importa controlar, já que irá determinar, em grande medida, a produtividade do processo. O planeamento, conhecimento e controlo das etapas de todo o ciclo são essenciais para garantir o sucesso e eficiência da produção. É, por isso, um fator a ter em consideração de antemão na elaboração do desenho da peça.

A Figura 18 demonstra o peso relativo de cada etapa para o tempo total do ciclo. É importante que cada passo seja otimizado. Por exemplo, o arrefecimento é, de modo geral, a etapa que ocupa a maior parcela de tempo durante cada ciclo. Assim, um desenho eficiente do circuito de arrefecimento reduz o tempo do arrefecimento, o que, por sua vez, aumenta a produtividade do processo. Adicionalmente, o arrefecimento uniforme da(s) peça(s) melhora a qualidade final do produto, por via da redução de tensões residuais e da manutenção da tolerância dimensional [14].



Figura 18 – Tempo relativo das etapas para o tempo total de ciclo [14]

2.1.4. Importância dos parâmetros do processo

A qualidade da peça é influenciada pelas condições sob as quais esta é processada. A temperatura do polímero e a pressão de injeção são fatores especialmente importantes, já que irão determinar, em grande medida, o fluxo do polímero desde o bico à cavidade [14].

Como mostra a Figura 19, quanto menor for a temperatura do polímero, maior é a pressão necessária para o levar à cavidade. Por outro lado, no caso de a temperatura ser demasiado alta, pode correr-se o risco de degradar o material. Caso a pressão seja baixa, pode haver um enchimento incompleto; se for alta, haverá rebarbas [14].

A temperatura é um dos fatores mais importantes no processo. Para se atingir a temperatura ideal, há que ter em conta a influência da temperatura atingida na injetora e no interior do molde. Existe uma gama de temperaturas aconselhada para o processamento cada material, o que facilita a parametrização do processo [14].

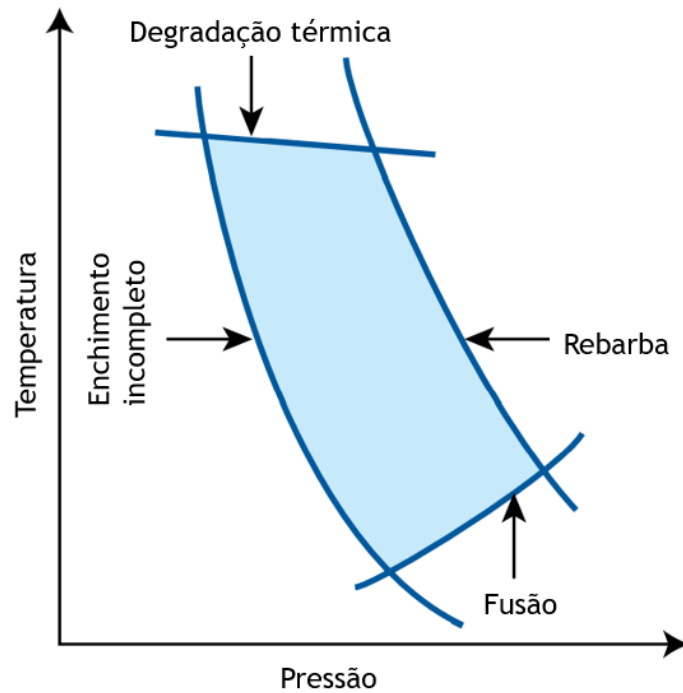


Figura 19 – Janela de processo da influência de pressão vs temperatura [14]

A pressão é outro fator de grande importância para o processo. Esta é subdividida, essencialmente, entre a pressão exercida no bico da injetora para transportar o fundido para o interior do molde e a pressão de compactação que impede o retorno do fundido. De modo geral, a primeira deve ser máxima, para rentabilizar o processo, diminuindo o tempo de injeção. A segunda, deve ser mínima, para diminuir a introdução de tensões na peça durante o seu arrefecimento, o que poupa material e custos operacionais, dado que a peça terá menos tendência para o empeno [14].

Por fim, o fator que mais pode afetar os custos associados ao processo: o tempo.

Depois de ser feita uma análise ao processo, depois de terem sido otimizados todos os parâmetros que produzem os resultados qualitativos desejados, independentemente do tempo, o objetivo deverá ser minimizar o tempo do processo. Assim, aumenta-se a produtividade, em termos de unidades injetadas por unidade de tempo. Isto terá de ser concretizado através de um esforço e análise coletivos das partes interessadas, através da partilha de experiências e conhecimentos, tópico que será aprofundado no Capítulo 5.

2.2. Molde para injeção de plástico

Para a obtenção de um produto final pelo processo acima explicado, a utilização de um molde é condição essencial. Antes de partir para a conceção e posterior construção desta ferramenta, além do conhecimento técnico específico, é necessário ter um bom conhecimento do *design* do produto, do termoplástico e suas características e do processo de moldação, como já referido. Assim, a comunicação clara entre, a jusante, o cliente, os designers do produto e engenheiros de injeção, e, a montante, os designers e

responsáveis pela construção do molde, é condição basilar para um bom planeamento da construção do molde [6].

Partindo para a perspetiva da indústria – e que este trabalho pretende integrar – um molde, como ferramenta, consiste num conjunto de placas de aço, entre outros componentes com diversas utilidades, que, quando devidamente assembled e instalados numa máquina de injeção, são capazes de conformar um termoplástico a uma forma idealizada. Na sua maioria, os moldes têm como material base aços ferramenta de elevada qualidade e são capazes de assegurar, com exatidão, os formatos e tolerâncias exigidos. Adicionalmente, suportam temperaturas elevadas e mudanças de temperatura abruptas durante vários ciclos (tipicamente curtos) de produção, tornando todo o processo de injeção eficiente e económico [6].

Os moldes são compostos, tradicionalmente, por uma parte fixa, integrada na máquina de injeção onde se dá a entrada do fundido, e uma parte móvel que garante o movimento cíclico do molde para a extração da peça conformada (abertura) e novo ciclo de injeção (fecho). A separação entre estas duas partes é denominada linha de apartação do molde. A Figura 20 esquematiza a configuração básica de um molde.

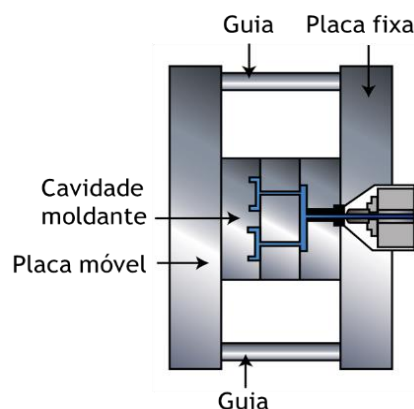


Figura 20 – Configuração básica de um molde [14]

Um molde integra vários sistemas que, em conjunto, garantem o sucesso de todo o ciclo de injeção.

O sistema de impressão é aquele em que, através da cavidade moldante (conjunto cavidade e macho), é conferida geometria ao fundido de material polimérico. Neste sistema, a construção, acabamento e polimento do molde são essenciais para a manutenção das tolerâncias exigidas [15].

O sistema de alimentação (Figura 21) é responsável pelo transporte do fundido desde o bico de injeção à cavidade moldante. O fundido deixa a injetora no bico, que percorre inicialmente o molde pelo gito. Depois, é através dos canais de distribuição principais e secundários (que podem ou não estar maquinados no molde) que chega aos ataques e, por fim, à cavidade moldante [15]. O *layout* do sistema de alimentação terá uma grande influência no padrão do enchimento e, conseqüentemente, na qualidade final da peça.

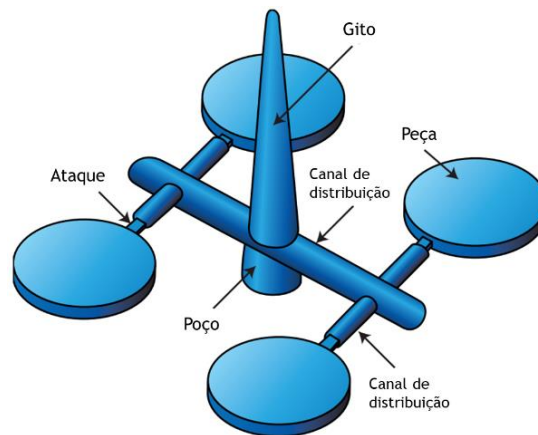


Figura 21 – Sistema de alimentação genérico de um molde [14]

A centragem e guiamento, constituído pelos guias, é o sistema responsável por garantir o perfeito alinhamento entre o molde e a máquina de injeção (centragem) e que faz com que, após a abertura do molde, a parte móvel regresse exatamente à posição inicial para início de novo ciclo (guiamento). Esta função é essencial para a eficiência e reprodutibilidade do processo, uma vez que eventuais desalinhamentos podem dar origem vários defeitos e até a paragens no processo [15].

O escape de gases é feito na cavidade moldante, permitindo que sejam libertadas partículas gasosas (ar e gases voláteis) para o exterior da cavidade durante o ciclo, por forma a garantir que a peça enche totalmente e não se criam defeitos na peça, como prisões de ar [15].

O sistema de arrefecimento, ou controlo de temperatura, é composto por vários canais que percorrem o interior do molde, nos quais circula um líquido refrigerante, e tem como objetivo a diminuição de temperatura da peça até à sua solidificação. Assim, o abaixamento da temperatura da peça é feito através da temperatura imposta nas paredes do molde. Na maioria dos processos, como visto anteriormente, o arrefecimento é o passo que ocupa a maior parte do tempo de ciclo, sendo altamente desejável, de modo geral, encurtar o tempo de arrefecimento da peça [15].

A produtividade do ciclo de injeção é fortemente influenciada pela eficiência do sistema de arrefecimento (Figura 22), sendo, por isso, vital maximizar a respetiva eficiência para minimizar o tempo de arrefecimento. A uniformidade no arrefecimento é, por isso, essencial, dado que não só torna o processo mais rápido, como também implica uma melhoria da qualidade do produto, graças à diminuição das tensões residuais na peça e a um incremento da estabilidade dimensional [14].

No final do ciclo, após a abertura do molde, dá-se a extração da peça. A peça tende a aderir às paredes do molde, consequência dos fenómenos de contração que se dão durante o arrefecimento da peça. Assim, torna-se necessário conseguir remover a peça o mais rapidamente possível, garantindo que a mesma mantém os parâmetros qualitativos. É por via de cilindros pneumáticos ou hidráulicos que se dá a extração, podendo, na maioria dos casos, ser controlada pela máquina de injeção [15].

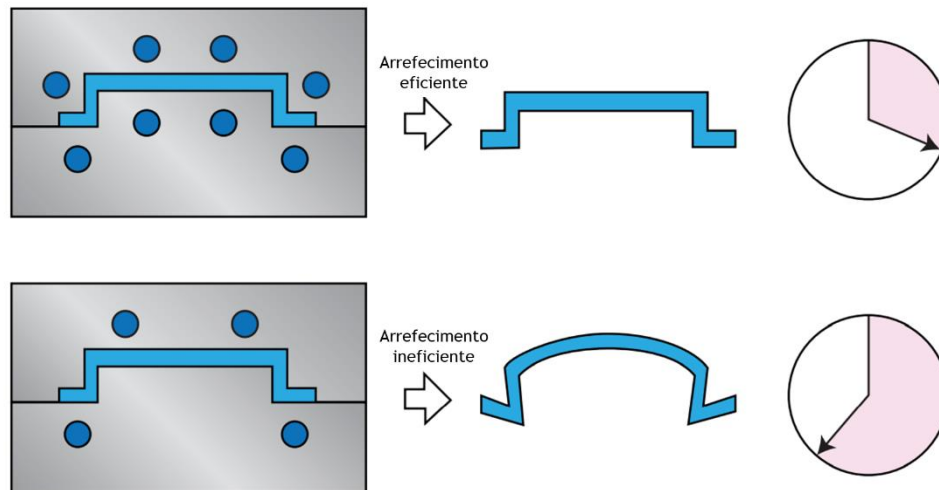


Figura 22 – Vantagens de um sistema de arrefecimento eficiente e adequado [14]

Quando a ação de abertura do molde é suficiente para a extração da peça, estamos perante uma extração simples. Nos casos em que há mais do que uma direção de saída – extração com contra-saída, ou saída negativa – é necessário recorrer a movimentos laterais ou rotativos, componentes flexíveis, balancés ou extração forçada [15].

2.2.1. Tipologia de moldes

Do ponto de vista do volume de produção, os moldes podem ser classificados em três categorias:

- moldes protótipo (25 a 1000 peças), que podem servir para ensaios, previsão de construção do molde e previsão da qualidade das peças;
- moldes para produção de baixo volume (1000 a 10 000 peças) e
- moldes de alto volume (10 000 a 2 000 000 de peças), que produzem peças de qualidade fiável, possuem cavidades múltiplas e várias peças intercambiáveis.

Devem ser construídos com a durabilidade face a condições adversas para o material e manutenção a longo prazo em vista, para o caso de alto volume de produção [6].

No que diz respeito ao modo do funcionamento, número de placas e tipo de sistema de alimentação utilizado, o universo de soluções disponíveis e implementadas no setor é muito vasto. No entanto, há que destacar os moldes de duas e três placas, recorrendo a canais frios ou quentes.

Antes de abordar os tipos de moldes, é importante estabelecer as semelhanças entre moldes que, sendo ferramentas complexas e diversificadas, possuem elementos em comum, estando a maioria destes elementos exemplificada na Figura 23.

Os elementos comuns mais importantes e suas funções são:

Placa de aperto da injeção – Suporte da(s) placa(s) de cavidade(s), anel de centragem e injetor principal. Esta placa segura a parte fixa do molde. Para aplicações como em moldes de duas placas, esta placa e a placa de cavidades podem ser conjugadas numa só, servindo os dois propósitos [6].

Anel de centragem – Alinhamento do molde com o bico da máquina de injeção. Os bicos das máquinas de injeção divergem em diâmetro e características, tornando-se o correto dimensionamento e ajuste do anel condições necessárias para compatibilizar a máquina e molde [6].

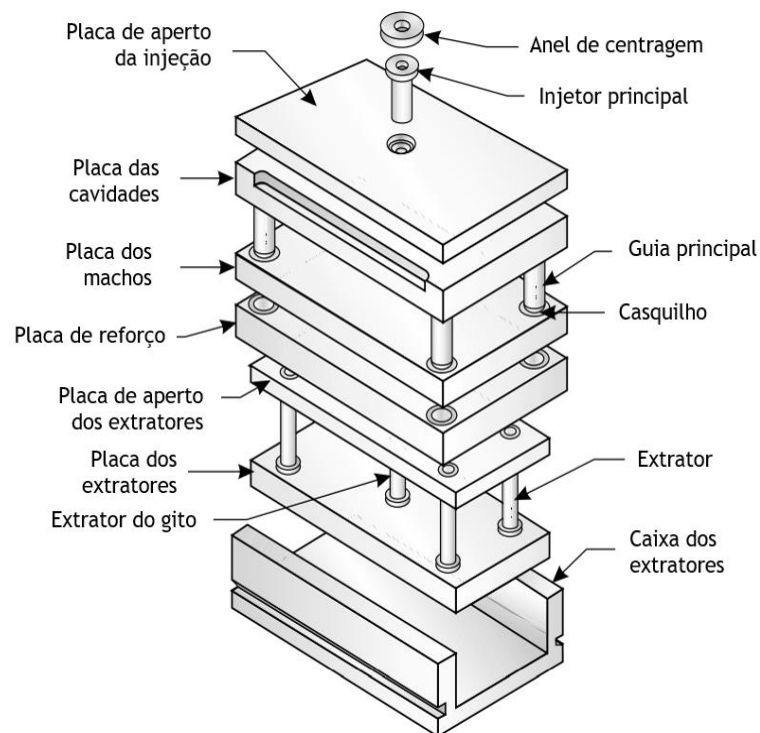


Figura 23 – Elementos comuns aos diversos tipos de molde [6]

Injetor principal – Selagem do fundido do bico da injetora, direcionando o plástico em forma cônica, forçando-o pelo gito, canais de alimentação e ataques, até à cavidade. Internamente, a forma do injetor é afunilada e pode variar de dimensões. Idealmente, o injetor deve ser o mais curto possível, de acordo com a forma da peça, reduzindo o abaixamento de pressão no sistema de alimentação [6].

Placa(s) de cavidade(s) – Alojamento e suporte da(s) cavidade(s) ou insertos do macho, injetor principal e sistema de alimentação. Dependendo da ideologia de construção pensada para o molde, a cavidade pode ser maquinada diretamente na placa ou conter bolsos para acomodar cavidades fabricadas separadamente. Os guias principais são montados nesta placa, que é a última da componente fixa [6].

Placa(s) de macho(s) – Alojamento da outra metade da cavidade, ou macho da peça, assim como do puxador do gito e das buchas dos guias principais. O plano entre esta e a placa de cavidade é, tipicamente, o plano de separação, separando o molde em sensivelmente duas partes [6].

Placa de reforço – Suporte e reforço da(s) placa(s) de macho(s), de modo a evitar a deflexão durante a injeção nas cavidades [6].

Caixa dos extratores (*ejector housing*) – Garantir a altura necessária ao movimento do sistema de extração. A base da caixa (*housing*) fixa a parte móvel do molde à placa móvel da máquina de injeção. Esta caixa acomoda todo o sistema de extração e contém suportes verticais soldados à placa de aperto da extração.

Placa de aperto da extração – Aperto da parte móvel do molde à placa móvel da máquina. Para moldes de grande dimensão, o sistema de extração pode necessitar de suporte adicional, inserindo-se pilares que aguentem a carga entre as placas de aperto da extração e a de suporte inferior [6].

Placa de aperto dos extratores – Montada no topo da placa dos extratores, responsável pelo rolamento dos extratores e retenção das cabeças dos extratores, extrator do gito e pernos de retorno [6] [15].

Placa dos extratores – Forma conjunto com a placa de aperto de extratores, permitindo o movimento de abertura do molde, sendo o suporte dos extratores.

Extrator do gito – Puxar o poço do gito (sólido) automaticamente aquando da abertura do molde, auxiliando na extração da peça e do sistema de alimentação após solidificação [6].

Extratores – Entram na cavidade para contactar a parte moldada [6].

Guias e casquilhos principais – Alinhamento das placas durante o fecho do molde. Um dos guias tem um ligeiro desalinhamento para que as duas metades do molde só possam fechar quando os guias principais estiverem na posição adequada, auxiliados pelo rolamento permitido através dos casquilhos. Podem ser acoplados a qualquer uma das metades do molde [6].

As soluções utilizadas na injeção de plásticos, no que a moldes diz respeito, diferem bastante na geometria da peça, aplicação final, tolerâncias, vida do produto, tempo de fabrico necessário, eficiência económica, automatização do processo, etc. Todos estes fatores resultam em diferentes opções aquando do fabrico do molde. Abordar-se-ão abaixo, genericamente, os principais tipos de moldes utilizados para a injeção de termoplásticos.

2.2.1.1. Moldes de duas placas

A nomenclatura utilizada deriva do facto de existir apenas uma linha de separação que, no caso, é definida pela superfície em que ambas as partes do molde (móvel e fixa) se separam para permitir a extração da peça e respetiva alimentação. Como abordado anteriormente e visível na Figura 24, do lado das cavidades, encontram-se o anel de centragem e o injetor, agregados à parte fixa. No lado da placa do macho, a parte móvel do molde contém o sistema de alimentação e o de ejeção. No final do arrefecimento, após a solidificação, dá-se a extração durante a abertura do molde [6].

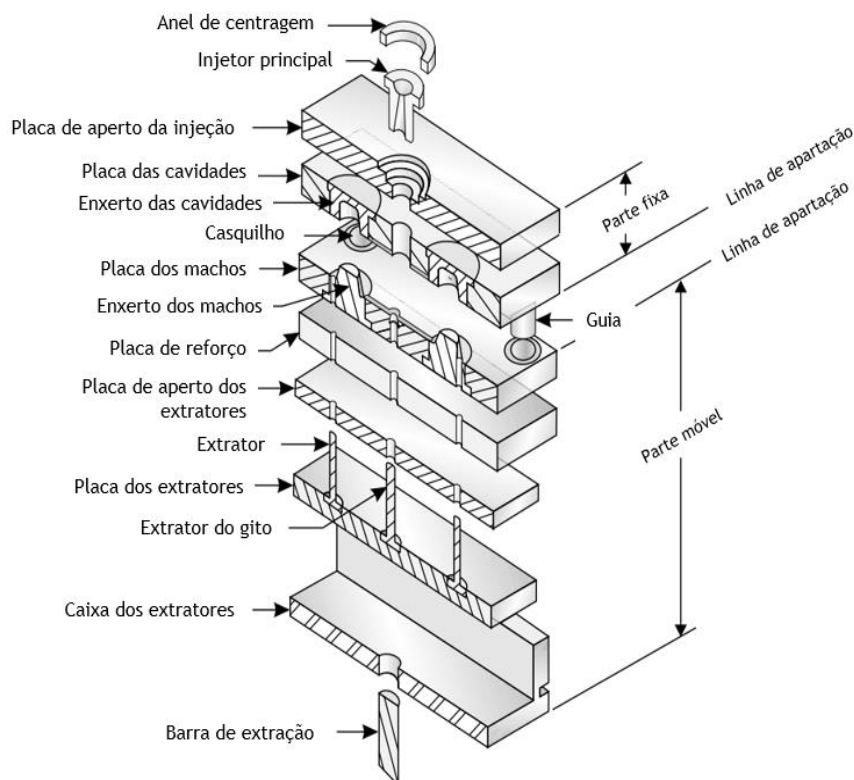


Figura 24 – Esquema de secção transversal de molde de duas placas [6]

2.2.1.2. Moldes de três placas

Este tipo de molde, esquematizado na Figura 25, é utilizado quando existem cavidades múltiplas e a geometria da peça exige uma extração por placa flutuante.

O molde abre na linha de separação e o gito é extraído, sendo o sistema de alimentação retirado, uma vez que a abertura das placas causa a separação no ataque. De seguida, a peça move-se com a placa flutuante, e quando chega ao máximo de abertura, intervêm os extratores. Depois, dá-se o fecho do molde e repetição do processo. Os moldes de três placas permitem uma separação automática da peça e do sistema de alimentação, automatizando um processo que, noutro sistema, teria de ser manual [6].

Ambos os exemplos anteriores apresentam canais frios — os canais são separados e reciclados no final do ciclo. Normalmente, são concebidos para consumo mínimo do material, assegurando a normal alimentação da cavidade [14]. Contrastando, existem moldes de canais quentes.

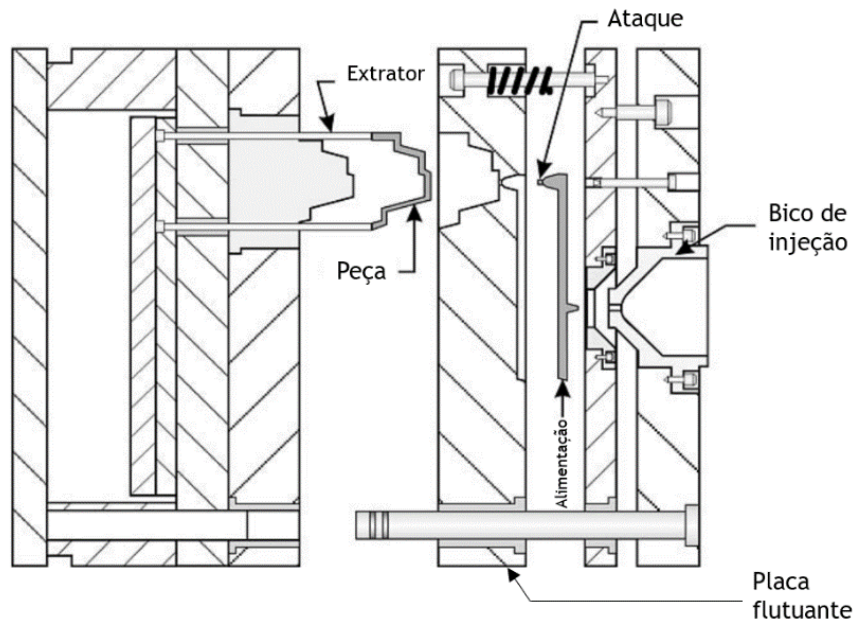


Figura 25 – Esquema de secção transversal de molde de três placas [6]

2.2.1.3. Moldes de canais quentes

Em moldes de canais quentes, o fundido atravessa um sistema aquecido, onde a quantidade de fundido é dividida igualmente pelo número de cavidades no molde. A temperatura do fundido é controlada através de válvulas situadas na entrada da cavidade, fazendo com que o plástico fundido só preencha a cavidade quando se encontrar à temperatura pretendida (Figura 26).

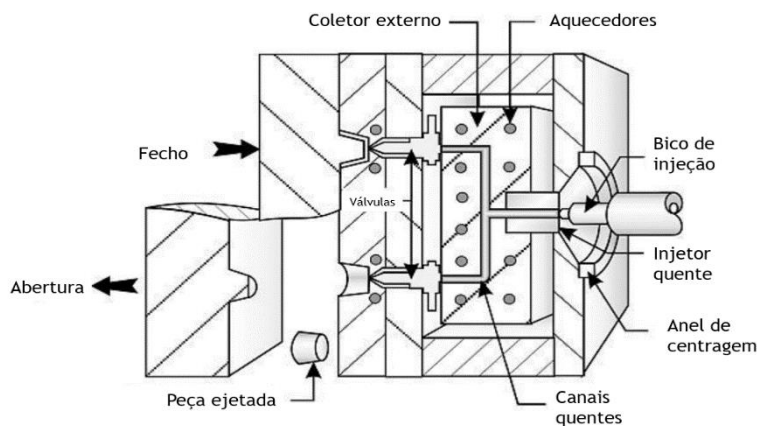


Figura 26 – Esquema de secção transversal de molde de canais quentes [6]

Este tipo de molde pode resultar em poupanças de custo de até 50%, numa melhoria da qualidade da peça, em tempos de ciclo mais curtos e ainda numa poupança de tempo de remoção de sistema de alimentação. Ao contrário dos canais frios, estes sistemas mantêm a temperatura do plástico uniforme até que este entre na cavidade, uniformizando a viscosidade do fluido e aumentando o controlo da pressão de injeção, reduzindo a quantidade de plástico a injetar. Por todas estas razões, são moldes mais caros, exigindo maior manutenção, e, uma vez que recorrem a sistemas mais complexos, exigem operadores especializados [6].

2.3. Projeto do molde

Do ponto de vista de projeto do molde, há várias opções que podem ser tomadas relativamente a fatores como a geometria da peça, a rugosidade, a aplicação final, as tolerâncias, o tipo e o local de injeção, os canais de arrefecimento, os parâmetros do processo, a eficiência económica, a automatização do processo de injeção, entre outros, que vão ditar o tamanho, o tipo e o material de base do molde a utilizar para atingir a peça desejada [6].

A seleção do material do molde é influenciada por estes fatores, mas há que ter em especial consideração a moldação criada pela cavidade e as dificuldades de tratamento térmico. Demasiada variação de espessuras nas cavidades requer mais atenção em tratamento térmico do molde, dado que o tempo para atingir a temperatura necessária em secções de maior espessura, pode causar sobreaquecimento em zonas finas. Têmperas a partir de temperaturas altas, fissurações ou distorções podem manifestar-se onde uma secção grosseira contactar uma secção fina [6].

O planeamento da injeção desempenha um papel central no correto desempenho do molde. Se na cavidade houver paredes demasiado finas, pode verificar-se uma deflexão elástica excessiva ou até fissuração para tensões impostas durante o serviço. Neste caso, o aumento da espessura das paredes anularia problemas de qualidade na peça, como rebarbas, falta de controlo dimensional, fraco acabamento superficial e enchimento incompleto [6].

Todas estas problemáticas acentuam a necessidade de intervenção de construtores de moldes com padrões de qualidade elevados que correspondam às necessidades da indústria. Tradicionalmente, o desenvolvimento e construção de um molde seguem o seguinte procedimento [6]:

- desenho da peça completo e aprovado para moldação (com recurso a análise preliminar *Moldflow*);
- planificação do processo de moldação, na qual, idealmente, o *designer* do produto, o responsável pela maquinaria, o *designer* e construtor do molde, o engenheiro de processo (injeção) e o fornecedor da matéria-prima discutem as necessidades do produto, relacionando-as com o esquema e construção do molde;
- desenvolvimento de uma proposta inicial de estrutura e *design* do molde, pelo *designer* do mesmo;
- revisão do *layout*, feita pelos vários interessados; se necessário, sugestões e recomendações para alteração e, posteriormente, autorização para o fabrico;
- concretização final e pormenorizada do *design* do molde e revisão final por parte dos responsáveis;
- construção do molde;

- bateria de ensaios para avaliação pelo construtor do molde, onde podem e devem estar presentes o responsável de maquinagem, o engenheiro de processo e o cliente;
- inspeção e certificação documentada de que todas as amostras cumprem as dimensões exigidas pelo cliente;
- ajustes ao molde, se necessário;
- aprovação das peças moldadas e fabrico de lote de pré-produção;
- tratamento superficial e polimento de cavidades e machos.

De modo genérico e abrangente, são estas as diversas etapas envolvidas no projeto e construção de um molde.

O projeto de moldes é um problema de engenharia extremamente complexo. Carece de uma análise profunda e cuidada dos requisitos de cada peça e de definição clara de prioridades. Os responsáveis pelos projetos devem ter vasto conhecimento e experiência sobre o comportamento dos materiais e o processo de injeção, para além do funcionamento dos diversos componentes do molde. Adicionalmente, é necessário que possuam conhecimento sobre todas as interações entre os diversos sistemas que atuam no processo.

2.4. Construção do molde

A construção do molde inicia-se após estar concluída a fase de projeto.

Em primeiro lugar é cortado o bloco de material que originará o molde— tipicamente, aço ferramenta. É possível que este seja submetido a tratamentos térmicos, pré ou pós operações de corte. O projeto do molde é passado ao programador de CNC que irá programar as máquinas de acordo com os parâmetros delineados pelos projetistas. Nesta fase, o *software* CAM é especialmente relevante.

Após a conclusão da primeira etapa de maquinagem, os componentes seguem para a bancada, onde os técnicos montam o molde, verificando o correto ajuste de todas as partes. Tipicamente, nesta fase dão-se os ajustes necessários, garantindo-se, por exemplo, que o macho e cavidade estão alinhados dentro do molde.

A maquinagem não se dá exclusivamente pelas fresadoras CNC, recorrendo-se também a outras operações como eletroerosão e furação profunda para produzir detalhes interiores do molde. Outra etapa importante, que pode ser incluída na maquinagem, é o polimento e acabamento. Estas são especialmente importantes para as cavidades, uma vez que podem ser determinantes no fluxo do material e qualidade superficial da peça. Dependendo do tipo e requisitos do molde, as operações de maquinagem podem variar em número, complexidade e custo.

Por fim, o molde é submetido a uma série de testes para determinação dos aspetos a melhorar e dos ajustes necessários.

2.5. Ensaio e ajustes ao molde

O ensaio do molde é um passo extremamente importante para todo o processo. Concluído o projeto e realizados e interpretados os estudos de *Moldflow*, a informação assim obtida terá de ser contrastada com a realidade. Assim, os ensaios consistem precisamente na verificação final de tudo o que foi previsto pelos engenheiros, incluindo as informações preditivas dadas pelo *Moldflow*. A introdução dos parâmetros utilizados na realidade é essencial para a correta utilização do *Moldflow*; assim, o técnico deverá estar sempre presente no ensaio, para poder garantir a correlação correta entre os parâmetros introduzidos e a credibilidade dos estudos.

As etapas de verificação de um ensaio realizado na *Azemoldes*, são:

A – GERAL

- A1. local do ensaio (previsto)
- A2. máquina (prevista)
- A3. matéria-prima (prevista)
- A4. matéria-prima – estufagem (previsto)
- A5. condições especiais (respeitadas)

B – FUNCIONAMENTO DO MOLDE

- | | |
|--|---|
| B1. injeção (suficiente / bem distribuída) | B7. fugas de água (não existem) |
| B2. extração (sistema / curso) | B8. fugas de óleo (não existem) |
| B3. curso dos balancés (suficiente) | B9. refrigeração da cavidade (suficiente) |
| B4. curso dos movimentos (suficiente) | B10. refrigeração do macho (suficiente) |
| B5. retenção dos movimentos (existente) | B11. refrigeração movimentos (suficiente) |
| B6. fugas de gases (suficiente) | B12. elementos de aquecimento (funcionam) |

C – PEÇAS INJETADAS

- | | |
|--|--|
| C1. identificação das cavidades (correta) | C6. aspeto do ponto de injeção (aceitável) |
| C2. gravuras do cliente (corretas) | C7. textura (especificada) |
| C3. rebarbas no plano de junta (não existem) | C8. polimento (especificado/zonas previstas) |
| C4. rebarbas nos movimentos (não existem) | C9. chupados (não existem) |
| C5. rebarbas nos extratores (não existem) | C10. empenos (não existem) |

D – CONCLUSÕES

- D1. molde testado com refrigeração?
- D2. peças têm zonas de enchimento difícil?
- D3. foi usado desmoldante?
- D4. molde protegido após ensaio?
- D5. objetivo do ensaio atingido?

Os aspetos a melhorar podem ter origem diversas origens, como é possível observar. O *Moldflow* será de especial utilidade para garantir as corretas previsões nas etapas B 1, 9 e 10, e todas as etapas C.

A título de exemplo, e como foi possível apurar nas respostas ao questionário, alguns dos erros comuns da injeção podem ser: eliminação de rebarba(s), canais de injeção, entradas de injeção, etc. Já no funcionamento do molde, podem ser: ajustes dimensionais, planos de junta não perfeitamente alinhados, correção de guias e postigos, etc.

É especialmente importante notar que, por vezes, é necessário mudar completamente o local de injeção ou canais de arrefecimento após o fabrico de um molde. As principais causas identificadas pelos construtores de moldes são: alterações da peça ou aquisição de novo sistema de injeção pelo cliente, tentativa de melhoria de processo, aspeto da peça insatisfatório, queimados, linhas de soldadura, compactação da peça, etc.

No Anexo A, pode consultar-se pormenorizadamente os principais defeitos que surgem nas peças produzidas pelo processo de injeção de plásticos.

Os custos associados às alterações ao molde derivam da necessidade de se afinar o molde de acordo com as expectativas do cliente. As empresas abordadas estimam que sejam

necessários, no mínimo, 3 a 5 ensaios para moldes relativamente simples, custando aproximadamente 2 000,00 €. Para moldes mais complexos, serão necessários 5 a 7 ensaios, com custo aproximado de 6.000,00 €. As alterações ao molde podem custar entre 2 000,00 € e 5 000,00 € (ou mais). Estes custos são previstos na fase de orçamentação e existem acordos para que o cliente suporte custos adicionais. Por outro lado, minimizando-se o número de ajustes feitos, diminui-se o tempo de entrega do molde ao cliente, o que se pode retornar vantagens competitivas no mercado.

Dado o elevado apetrecho tecnológico e demanda crescente da indústria de moldes, as ferramentas CAD/CAM/CAE apresentam-se, nas últimas quatro décadas, como fatores centrais no aumento da rapidez, da qualidade e da eficiência, por um lado, traduzindo-se em ganhos na redução de *lead-time* e custos.

2.6. Utilidade da aplicação de *software* CAE

Estas ferramentas informáticas permitem que os produtores de moldes possam confirmar que todas as condições e efeitos abordados ocorrem efetivamente durante o processo de injeção. O conhecimento assim obtido poderá produzir, por si só, uma relativa melhoria da qualidade do produto; apesar disso, apenas com a análise *Moldflow* (ou semelhante), durante a fase inicial do projeto, com projeção do molde para um padrão de enchimento otimizado, se poderá obter o controlo destes efeitos e tirar máximo partido de todos os benefícios [14].

A análise possibilitada por ferramentas CAE, como o *Autodesk Moldflow*, fornece informação útil para a conceção de peças, moldes e processos de conformação. De acordo com os métodos tradicionais, sem análise *Moldflow*, o engenheiro tem de contar com experiência passada, intuição, prototipagem ou testes de moldação para obter informação acerca do padrão de enchimento do polímero líquido, dos locais de potenciais defeitos (como linhas de soldadura e inclusões de ar), da pressão de injeção e pressurização necessárias, da orientação das fibras, do tempo de ciclo, da forma da peça final e da deformação e propriedades mecânicas de peças, entre outros aspetos [14].

A tecnologia de fluxo incide sobre o comportamento dos plásticos durante o processo de enchimento do molde. As propriedades de um plástico dependem de como a peça for moldada. Duas peças com dimensões idênticas e feitas do mesmo material, mas moldadas sob diferentes condições, irão apresentar níveis diferentes de tensão e contração, e apresentar comportamentos diferentes, o que significa que são, na prática, duas peças diferentes. A forma como o plástico flui para o interior do molde é de importância vital para a determinação da qualidade da peça. O processo de enchimento do molde pode ser analisado de forma absolutamente clara, graças à capacidade de previsão da pressão, da temperatura e das tensões [14].

Sem análise *Moldflow*, é muito difícil a obtenção de outros dados essenciais, mesmo com um molde apetrechado para os recolher, nomeadamente no tocante a parâmetros como a distribuição espacial de pressão, a temperatura, a tensão e a velocidade. A Figura 27

ilustra, de forma simples, as diferenças entre o processo tradicional de desenho, concepção e fabrico dos moldes para injeção de plástico, e o uso de *software* de simulação *Moldflow*.

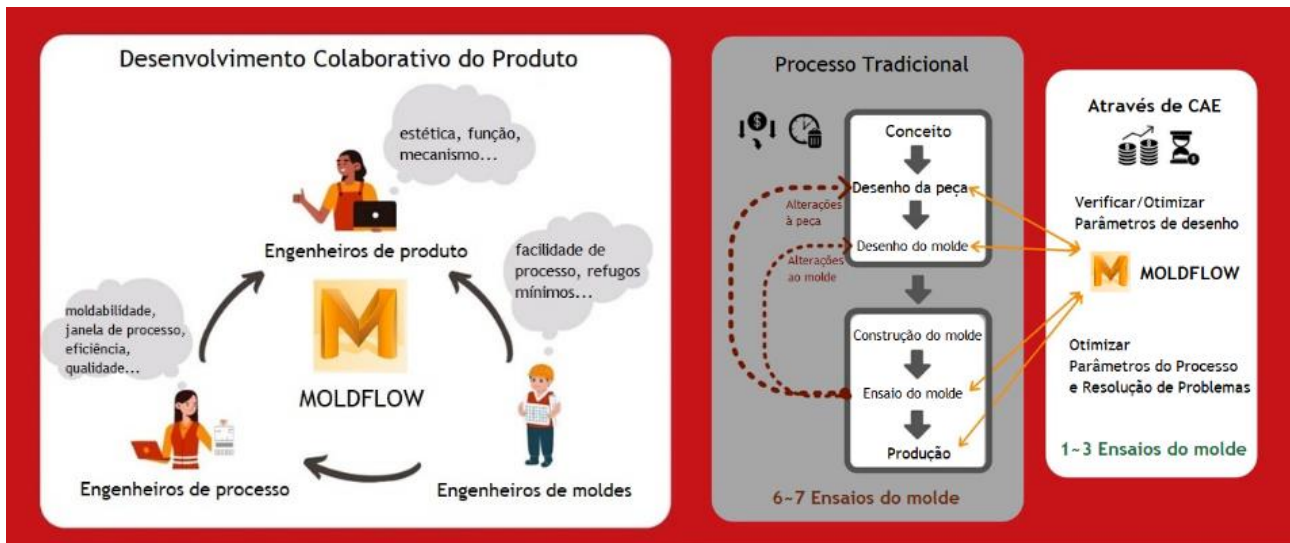


Figura 27 – Esquema ilustrativo da utilidade da tecnologia CAE para a indústria de moldes. [24]

Apesar de a tecnologia CAE ajudar a poupar tempo, dinheiro e matéria-prima – assim como a reduzir o número de ajustes e a melhorar a qualidade do molde – esta não é, de todo, a única fonte de obtenção de soluções para os problemas decorrentes da construção de moldes para a injeção de plásticos. Embora essenciais em engenharia, estas ferramentas não substituem as responsabilidades de um engenheiro. Como qualquer ferramenta, será tanto mais eficaz quanto mais proficiente for o seu utilizador e quanto mais fiel à realidade forem os dados introduzidos na simulação.

Os benefícios mencionados acima não serão aproveitados se as ferramentas não forem aplicadas de forma adequada. Além disso, os resultados gerados têm de ser corretamente interpretados por parte do engenheiro responsável, antes de se poder tirar uma conclusão ou tomar uma decisão informada [14]. Caso contrário, os utilizadores serão apenas sobrecarregados com informação, sem qualquer proveito.

3. *Moldflow*

O *Moldflow* é uma linha de produtos de *software* que fornece ferramentas avançadas para a simulação do processo de injeção de plásticos e respetivas variantes, facilitando a resolução de potenciais desafios no fabrico de peças plásticas. Desde a fundação da empresa em 1978, o objetivo consiste em otimizar o fabrico, de modo a que seja rápido, rentável e fiável.

Os moldes com balanço artificial de canais de distribuição, os moldes de cavidade múltipla e os moldes de cavidades diferentes, que são, atualmente, comuns na indústria, tornaram-se práticos graças às primeiras ferramentas de simulação e de calibração de

canais introduzidas em finais da década de 1970 e inícios da década de 1980 pela *Moldflow*. À medida que foram evoluindo, foi possível visualizar – e, portanto, controlar – os padrões de fluxo e as linhas de soldadura. A evolução continuou até à década de 2000, com um vasto leque de tecnologias sofisticadas que permitem controlar a distorção, calcular a transferência de calor, prever movimentação do macho, adaptar a produção a novos processos de moldação e efetuar muitas outras operações. Da tecnologia tradicional *midplane* às simulações em 3D, todas as soluções *Moldflow* estão perfeitamente integradas num ambiente de modelação de sólidos [14].

O *Autodesk Moldflow Insight*, o *software* utilizado para este trabalho, é composto por uma gama de produtos de análise e simulação organizados numa interface designada *Autodesk Moldflow Sinergy*. Ficando a cargo do *Insight* computar as simulações do utilizador, o papel do *Sinergy* (Figura 28) não é menos importante, pois permite a organização e preparação rápida e simples das simulações, assim como uma análise dos resultados pós-simulação que facilita a estrutura do *workflow* [16].

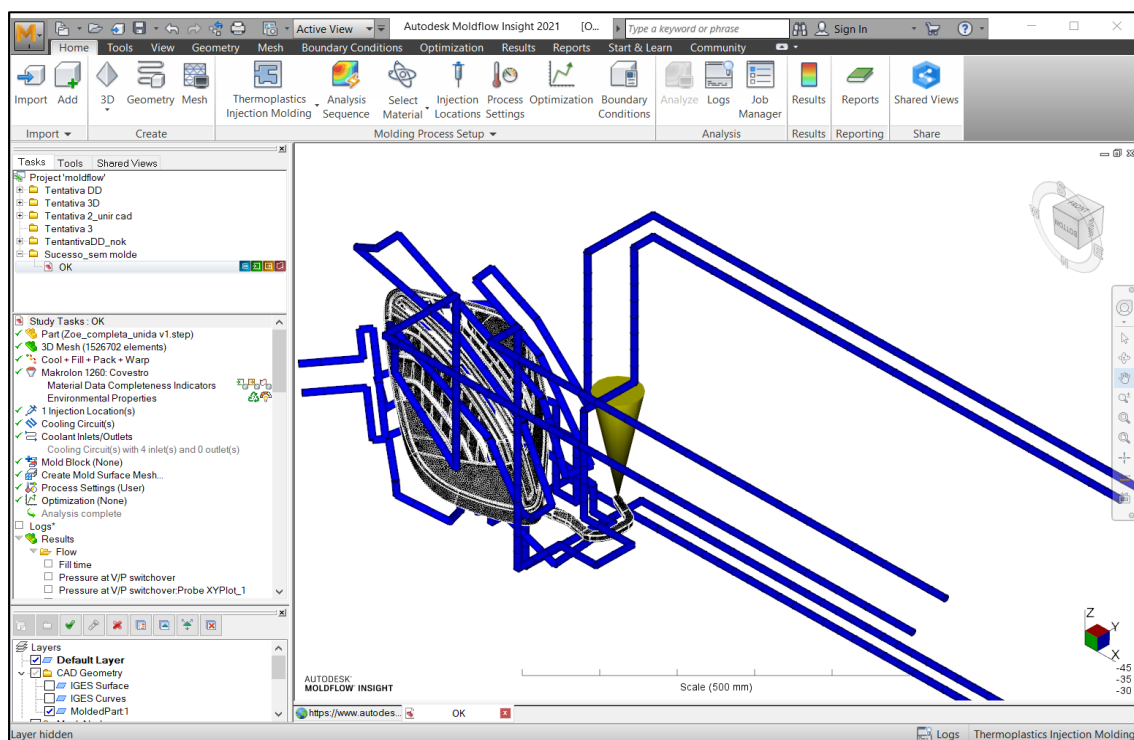


Figura 28 – Interface do utilizador, *Sinergy*

Dependendo da necessidade, a criação de cavidades múltiplas, sistemas de alimentação, circuitos de refrigeração, limites do molde e insertos é facilitada por *wizards*, para maior rapidez no trabalho. Por outro lado, a customização permitida é total, aproximando cada pormenor à realidade do processo, através da importação de entidades e modelos CAD dos diversos componentes do molde. Além disso, o catálogo de materiais é extremamente vasto, sendo possível efetuar simulações com mais de 10 000 polímeros; além disso, permite adicionar e pormenorizar mais materiais e respetivas características e comportamentos. Por fim, é possível criar relatórios pormenorizados, com animações e gráficos, de diversos estudos dentro de um projeto, que podem ser visualizados

gratuitamente, inclusivamente *online*. Esta ferramenta é crítica para a comunicação entre entidades e para a total compreensão e transparência, especialmente na interpretação dos dados reológicos [16].

A combinação de todas estas funcionalidades oferece ao utilizador uma introspeção dos diversos aspetos do processamento de plásticos, constituindo uma mais-valia para diferentes tipos de utilizadores, tanto ao nível da conceção da peça e do molde, como da injeção e do controlo de qualidade.

3.1. Workflow e princípios da análise

No início de uma análise *Moldflow*, deve ter-se em conta uma questão primordial: se a peça em estudo se encontra, ou não, em produção. A resposta conduzirá a dois tipos de trabalho distintos, que podem ser estruturados e resumidos de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 29.

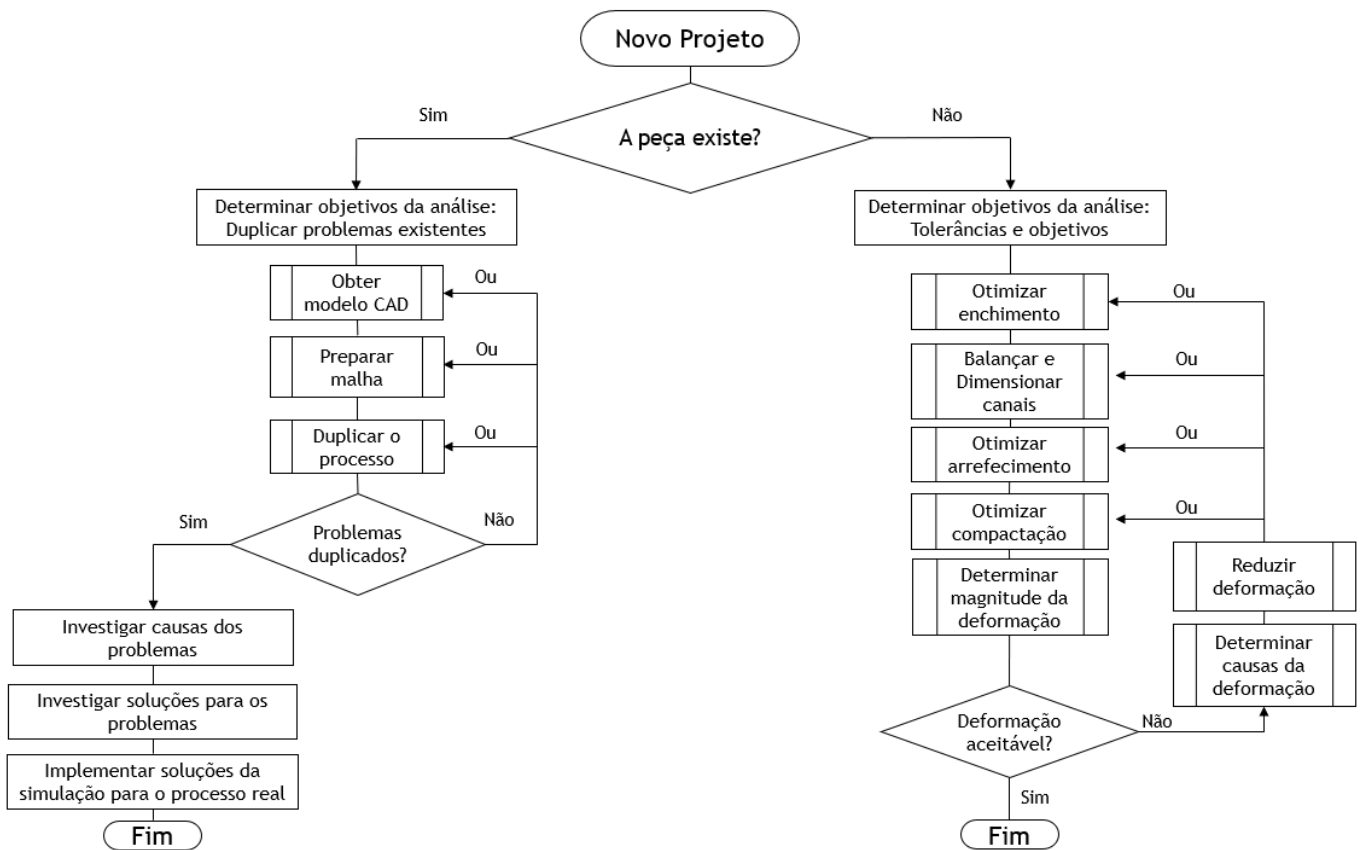


Figura 29 – Fluxograma do procedimento para estudo de uma peça [16]

É importante compreender também que a sequência em que as etapas são executadas influencia em larga escala o resultado da simulação. Assim, a simulação deve iniciar-se por [16]:

1. **Determinar o número de ataques** – garantir que a pressão se encontra abaixo da capacidade máxima da injetora (como abordagem conservadora, começar com 50% da pressão máxima), adicionar ataques, se necessário, para reduzir a pressão necessária para o enchimento;
2. **Posicionar os ataques para poder equilibrar o enchimento** – o posicionamento dos ataques deve levar a uma frente de fluxo que encha a cavidade na correta proporção, sem frentes em sentidos opostos por defeito (*underflow*), ou por excesso (*over-packing*);
3. **Garantir um padrão de fluxo unidirecional** – o padrão de fluxo deve ser uniforme e o mais retilíneo possível, precavendo hesitação, *underflow* ou linhas de soldadura;
4. **Desenhar o sistema de alimentação** – o sistema de alimentação deve ter em conta o padrão de fluxo desejado, devem ser equilibrados (produzir um fluxo uniforme entre si) e ter o menor volume possível.

Os pontos 1 a 3 são aquilo a que se pode chamar “otimização da peça”; por isso, devem ser considerados sempre em conjunto. A otimização da peça deve ter sempre em consideração também o *layout* do molde e as restrições na localização do ataque. Estes constituem os “*Moldflow Design Principles*”.

O desenho do sistema de alimentação complementa a otimização da peça. Os canais de distribuição devem ser concebidos de forma tal que não imponham limitações ao tempo de ciclo nem controlem o processo. Caso a dimensão dos canais seja demasiado grande, o arrefecimento é mais lento, por exemplo. Em casos em que os canais não estão otimizados, pode compensar-se o desequilíbrio através do tempo de enchimento, mas isso limitará sempre as condições do processo em que é possível operar.

Aquando da otimização do *design* de uma peça já existente ou do *troubleshoot* de um determinado problema, para se garantir o sucesso do projeto de simulação, é necessário que se proceda do seguinte modo [16]:

1. **Determinar o objetivo da análise** – o resultado pretendido com a análise deve ser claro desde o início, principalmente a identificação dos problemas que se pretende resolver ou prevenir. Sem isto, o tempo e dinheiro investidos na análise podem não ser totalmente aproveitados;
2. **Discutir o projeto com todos os interessados** – os responsáveis pelo material, pelo *design* da peça, pelo projeto/construção do molde e pela produção devem estar envolvidos na análise. Normalmente, o técnico de análise pertence a um dos grupos, mas não a todos. É essencial que este considere as necessidades, preocupações e restrições identificadas por cada um dos intervenientes, ao elaborar um projeto;

3. **Potenciar os conhecimentos prévios** – o analista deve munir-se da sua experiência em projetos passados e dos conhecimentos adquiridos ao longo da sua atividade em engenharia;
4. **Aplicar “*Moldflow Design Principles*”** – aplicando-se os princípios expostos acima, prevê-se e minimiza-se os problemas decorrentes de não se ter tido em consideração o fluxo do plástico;
5. **Aplicar “*Moldflow Design Rules*”** – na interpretação de resultados, devem aplicar-se as regras de *design* para se evitar ou minimizar problemas como o abaixamento excessivo de temperatura durante o enchimento ou o excesso dos limites previstos para as tensões de corte e a taxa de corte do material;
6. **Interpretar resultados e fazer alterações necessárias** – o uso do *Moldflow* para otimização da peça é um processo iterativo. As mudanças fazem-se em função de uma interpretação cuidada de análises já realizadas;
7. **Discutir alterações com os interessados** – garantir que as alterações propostas através da análise são aceitáveis para os envolvidos. Por exemplo, pode haver propostas de alteração para o grupo de ferramentas que são impossíveis de concretizar do ponto de vista de produção;
8. **Repetir análises até atingir resultados satisfatórios** – resultados práticos e exequíveis podem surgir apenas depois de várias iterações.

Estes princípios são fundamentais para potencializar o *Moldflow* como ferramenta CAE que produza soluções reais. Dentro de cada etapa do trabalho de simulação (Figura 29), existem vários passos sequenciais exaustivos a cumprir, os quais permitem que uma análise produza resultados otimizados e consistentes. É importante perceber, contudo, quais as ferramentas de simulação utilizadas para a análise e quais os resultados mais significativos.

3.2. Simulação de enchimento e compactação (*Fill+Pack*)

A análise e otimização do enchimento da peça é a fase mais relevante para o processo de injeção em si. Idealmente, esta produz respostas importantes para a fase de projeto, ao permitir obter dados concretos sobre os seguintes aspetos: enchimento (total ou parcial), localização e/ou quantidade dos ataques, existência de defeitos, contração da peça – entre outros. Nem todas as respostas podem ser dadas sem a simulação conjunta do arrefecimento e empeno; contudo, nesta fase podem ser produzidos resultados esclarecedores [16].

Idealmente, deve conseguir-se otimizar o enchimento sem considerar o sistema de alimentação; contudo, nos casos em que tal não é possível, o sistema de alimentação pode até surgir como uma solução para se atingir os resultados pretendidos. Se o enchimento não for válido, será impossível corrigir problemas causados pelo mesmo através da análise de compactação e arrefecimento [16].

Assim que os canais de distribuição estiverem dimensionados, passa-se à análise da compactação e avalia-se a forma como a peça é compactada, sendo que a solidificação dos ataques e canais de distribuição vai afetar significativamente a compactação [16].

Os resultados da simulação de enchimento e compactação mais significativos são [16]:

- **Tempo de Enchimento** – apresenta resultados periódicos sobre a posição da frente de fluxo durante o processo de enchimento da cavidade;
- **Pressão no ponto de comutação** – o ponto de comutação indica (tipicamente em forma de % do volume total da peça) o ponto onde a injeção irá deixar de ser controlada pela velocidade (enchimento) e passará a ser controlada pela pressão (compactação). Este resultado indica zonas da cavidade nas quais a pressão de injeção pode ser demasiado alta;
- **Temperatura na Frente de Fluxo** – temperatura do fundido quando a frente de fluxo atinge determinado ponto, no centro da secção transversal da peça. Corresponde, por isso, a uma média de temperaturas;
- **Força de fecho** – força necessária para manter o molde fechado, enquanto a força oposta exercida pela entrada do plástico na cavidade é exercida;
- **Fração de camada solidificada no final do enchimento** – fração de espessura da camada solidificada. Um valor mais elevado representa uma zona mais espessa e que terá maior resistência ao fluxo. Considera-se que o polímero solidifica quando está abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g). Esta fração deve ser inferior a 0,20 – 0,25, para não dificultar a compactação. Este resultado deve vir acompanhado de simulação de arrefecimento;
- **Contração volumétrica** – incremento em densidade de determinado ponto, desde o fim do enchimento até à ejeção, quando a peça solidifica à temperatura ambiente de 25°C. Este resultado é especialmente útil para indicar zonas que poderão apresentar defeitos visuais causados por “rechupes” ou vazios. Altos valores de contração podem encontrar-se tipicamente em zonas de difícil acesso na injeção, nas quais a compactação não consegue atuar eficazmente. Este resultado deve vir acompanhado de simulação de arrefecimento;
- **Prisões de ar** – localização e probabilidade da localização de prisões de ar. Este resultado deve ser analisado confrontando-o com o tempo de enchimento para se verificar a influência do comportamento do fluxo neste defeito.
- **Linhas de soldadura** – ângulo de convergência de duas frentes de fluxo. A presença de uma linha de soldadura pode indicar uma fraqueza estrutural da peça ou um defeito superficial. Mais uma vez, sendo analisado em conjunto com o tempo de enchimento, é possível visualizar a convergência das frentes.

3.3. Simulação de arrefecimento (*Cool*)

Há duas razões de relevo para se proceder à otimização do arrefecimento: maximizar a qualidade da peça e minimizar o tempo de ciclo. No que diz respeito à qualidade, pode haver várias preocupações, sendo uma delas o acabamento superficial. A temperatura do molde pode influenciar a aparência da peça. À medida que a temperatura varia, também o brilho (*gloss*) varia. Para temperaturas altas, o acabamento fica mais brilhante – o que pode ser indesejável para algumas aplicações [17].

As tensões residuais e a dobragem térmica são dois problemas a ter em conta. À medida que a temperatura do molde aumenta, a taxa de arrefecimento diminuiu e mais tensões são aliviadas na peça, reduzindo as deformações, e conseqüentemente, o empeno. Diferenças de temperatura entre os lados da secção transversal da peça podem levar a empeno ou dobra devido à contração volumétrica não uniforme da peça [17].

O arrefecimento constitui a parte mais longa do ciclo. É um fator importante, uma vez que a redução do mesmo possibilita a produção mais rápida de peças proporcionando, deste modo, uma redução de custos. Quando os moldes estão otimizados para o arrefecimento, o tempo de arrefecimento será o mínimo possível. Isto significa que a peça pode ser ejetada a temperaturas mais elevadas, sem empenar em demasia, mantendo as dimensões críticas dentro das tolerâncias [17].

Os resultados da simulação de arrefecimento mais relevantes são [17]:

- **Caudal no circuito** – caudal do líquido arrefecedor no interior dos canais de refrigeração. Este resultado pode ser utilizado em conjunto com o número de Reynolds para determinar a turbulência do fluxo do líquido. O caudal não é o fator dominante na extração de calor, mas deve ser o mínimo possível para manter o número de Reynolds desejado no líquido. Para circuitos em série o caudal é constante, para circuitos paralelos não, dado que existe abaixamento de pressão;
- **Número de Reynolds** – número de Reynolds do líquido. O número de Reynolds (Equação 1) é a razão que define a taxa de fluxo de líquido no interior dos circuitos de refrigeração, indicando a quantidade e, por conseguinte, o tipo de turbulência do líquido.

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

Na Equação 1, ρ é a densidade do líquido, U é a velocidade média do líquido, d é o diâmetro do canal de refrigeração e η é a viscosidade dinâmica do líquido arrefecedor.

A água, que é o líquido arrefecedor mais comum, apresenta turbulência a partir dos 4 000 Re. Este tipo de fluxo é o indicado para situações de arrefecimento – embora quanto maior for o Re num circuito, mais energia será gasta para bombear o líquido. O número de Reynolds ideal para os circuitos de refrigeração é de 10 000 Re. Os custos associados ao bombeamento do líquido para manter os 10 000 Re são compensados pelos ganhos em transferência de calor que se pode obter quando o número de Reynolds atinge valores superiores (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de fluxo e respetivos números de Reynolds para a água [14]

Número de Reynolds	Tipo de fluxo
$Re > 4\ 000$	Turbulento
$2\ 300 < Re < 4\ 000$	Transição
$100 < Re < 2\ 300$	Laminar
$Re < 100$	Estagnado

A condução de calor para o fluxo laminar (Figura 30 (a)) dá-se através do fenómeno de condução, de uma camada para a outra. Por outro lado, quando o fluxo é turbulento (Figura 30 (b)), a transferência de massa radial faz com que o calor seja extraído tanto por fenómenos de condução como de convecção, sendo, por isso, mais eficiente [14].

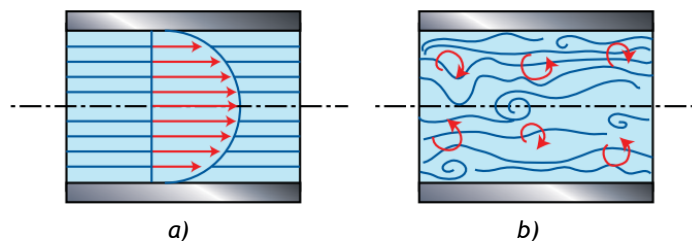


Figura 30 – Fluxo laminar (a) e fluxo turbulento (b) [14]

- **Temperatura do líquido no circuito** – temperatura do líquido arrefecedor no interior dos canais, desde a entrada do líquido (*inlet*), à respetiva saída (*outlet*). Este resultado é utilizado para verificar em que locais a diferença de temperatura pode ser excessiva (2°C a 3°C superior à temperatura do líquido arrefecedor). A falta de controlo deste parâmetro pode dar origem a defeitos na peça devido à existência de pontos quentes e ao facto de o arrefecimento poder não ser uniforme;
- **Temperatura do metal do circuito** – média das temperaturas do metal dos circuitos ao longo do ciclo. A temperatura deve ser distribuída uniformemente pelo circuito de refrigeração. Nas zonas próximas à peça, dadas as temperaturas inerentemente mais elevadas, o líquido irá aquecer. Em todo o caso, a temperatura ao longo dos canais não deve exceder os 5°C em relação à

temperatura de entrada no circuito. Caso tal aconteça, pode considerar-se a adoção de medidas de resolução como o aumento do caudal, o aumento do diâmetro do circuito, ou a adição de canais.

- **Temperatura do molde** – temperatura da interface entre o plástico e o metal (Figura 31), isto é, a temperatura da face interior do molde.

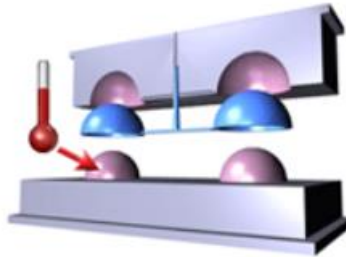


Figura 31 – Indicação da interface plástico e metal do molde [17]

Temperaturas diferentes entre os lados da cavidade e do macho podem mitigar arrefecimento desequilibrado ou empenos.

- **Tempo até atingir a temperatura de extração na peça** – quantidade de tempo desde o início do enchimento até se atingir a temperatura de ejeção da peça. Caso alguma zona na peça não tenha solidificado, é possível visualizar o tempo estimado até à solidificação. Idealmente, a peça deve solidificar uniformemente. As regiões em que o tempo de solidificação ultrapassa o desejado, pode haver uma espessura excessiva e pode equacionar-se efetuar ajustes na peça. Por outro lado, e se as alterações à peça não forem possíveis, pode considerar-se uma reduzir do tempo de ciclo através do abaixamento de temperaturas do molde ou até do fundido.

3.4. Simulação de empeno (*Warp*)

A principal causa de empenos é a variação na contração da peça. Se a peça contrair uniformemente em todas as direções e em todas as zonas, o resultado seria simplesmente uma peça mais pequena e não empenada. Controlando a variação da contração, é possível controlar o empeno [17].

Para o estudo que se irá realizar, a variação na contração pode ser classificada em três dimensões: (1) contração região-a-região, (2) contração ao longo da espessura da secção transversal da peça e (3) diferenças de contração ao longo da espessura da peça relativamente à contração no plano.

A contração região-a-região pode ser entendida como o diferencial de contração entre a região próxima do ataque e a última região a ser preenchida pelo fundido (*end-of-fill*). Também pode ser entendida como o diferencial de contração entre zonas finas e zonas espessas [17].

A contração ao longo da espessura é causada pela variação de temperatura num dos lados da secção transversal da peça relativamente ao outro. Simplificando: é a contração causada pela diferença de temperatura entre a cavidade e o macho [17].

As diferenças de contração ao longo da espessura relativamente ao plano de contração dão-se porque os polímeros tendem a contrair mais na direção da espessura do que no plano da superfície da peça, devido às paredes do molde. Nos cantos da peça, esta diferença pode causar empeno [17].

A contração volumétrica é a força motriz de todos os tipos de contração. Os plásticos apresentam valores de contração volumétrica muito elevados – tipicamente na ordem dos 25%, se não for aplicada pressão à medida que arrefecem até à temperatura ambiente. A pressão aplicada durante o processo de injeção limita a quantidade da contração. Assim, é muito importante ter em conta que os dados PVT (pressão, volume, temperatura) demonstram como a pressão e temperatura afetam a contração, ou alterações no volume [17].

Para materiais semicristalinos, uma taxa de arrefecimento rápida tem um impacto negativo na cristalinidade do material – uma vez que, ao arrefecer rapidamente, o polímero não tem tempo suficiente para formar a estrutura cristalina, o que provoca uma diminuição na contração volumétrica [17].

A orientação de cadeias poliméricas longas é causada inicialmente pela tensão de corte durante o fluxo. Quando o polímero se encontra a temperaturas elevadas e a tensão de corte é removida, a orientação relaxa. A orientação é definida pela combinação do corte e da solidificação. Nos casos em que o polímero tem a oportunidade de relaxar a orientação, poder-se-á assistir a uma contração mais severa do mesmo paralelamente ao fluxo. Em alguns casos, com os dos materiais cristalinos, as moléculas podem ser mais compactadas na perpendicular, o que provoca uma maior contração perpendicular ao fluxo, efeito comum em materiais sujeitos à cristalização induzida por corte [17].

Encontrando-se no interior do molde, a peça não contrai no plano da superfície. No entanto, pode contrair na direção da espessura. Uma vez ejetada, a peça pode contrair em todas as direções. Uma vez que, no interior do molde, a peça não pode contrair no plano superficial, gera-se um acúmulo de tensões residuais, as quais podem ser aliviadas enquanto a peça ainda se encontrar numa fase de arrefecimento até à temperatura ambiente, o que pode criar deformações. É importante ter em conta que a taxa de arrefecimento tem efeitos na restrição criada pelo molde. Se a temperatura do molde for mais elevada, a taxa de arrefecimento é menor, ampliando e potenciando o efeito de alívio de tensões na peça. A restrição imposta pelo molde também depende do tipo de material. Alguns materiais que apresentam resistência ao deslizamento irão relaxar lentamente e, conseqüentemente, tenderão a apresentar taxas mais elevadas de contração linear. Materiais que relaxam rapidamente, tenderão para uma menor contração linear [17].

Quanto à forma como provocam o empeno, os fenómenos de contração podem categorizar-se em três variantes: arrefecimento diferencial; contração diferencial; e efeitos de orientação.

- **Arrefecimento diferencial** – dá-se quando a diferença de temperatura entre os lados da peça é tão elevada que as diferenças da taxa de contração podem causar a dobragem da peça (Figura 32). Os perfis de temperatura da análise de arrefecimento podem constituir bons indicadores para este tipo de problema. Quanto maior a diferença de temperatura, maior a probabilidade de ocorrência de empeno. Temperaturas não uniformes podem ser causadas por: posicionamento inadequado dos canais de arrefecimento, controlo inadequado da temperatura do líquido arrefecedor e propriedades térmicas do molde [17];

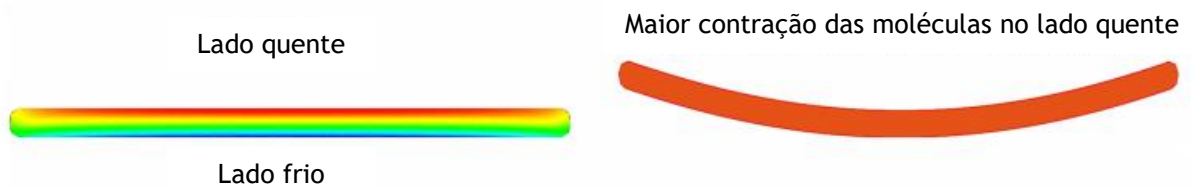


Figura 32 – Arrefecimento diferencial [17]

- **Contração diferencial** – também denominada **contração de área**, ou **isotrópica**, é a alteração de área numa região da peça. Tipicamente, a contração de área é mais pronunciada nas zonas mais afastadas do ataque e menos pronunciada junto ao ataque. Contudo, este fenómeno pode não ocorrer no caso de a pressão de compactação ser removida antes de o ataque ter solidificado. As principais causas de contração diferencial são: variação de espessura das paredes da peça; a posição do ataque relativa às secções finas e espessas da peça; parâmetros de processamento, particularmente tempo e pressão de compactação, e *design* e parametrização do sistema de refrigeração. A Figura 33 demonstra dois exemplos de empeno de um disco devido a contração diferencial. Na Figura 33 (a), a contração é muito elevada no centro, devido a um aumento de espessura no centro e a um tempo de compactação curto. Na Figura 33 (b), a peça apresenta contração elevada no perímetro da peça devido a um parâmetro mais espesso [17];

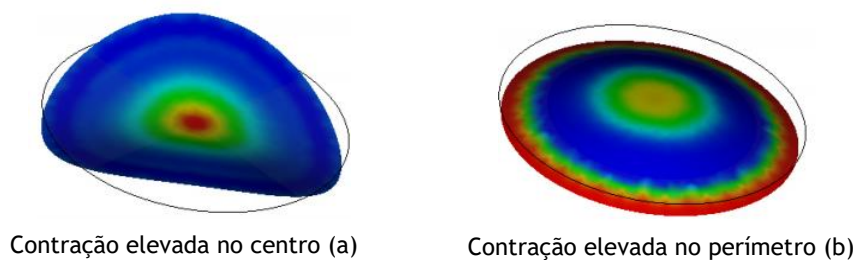


Figura 33 – Formas do empeno devido a diferenciais de contração [17]

- **Efeitos de orientação** – surgem quando se verifica uma diferença de contração paralela e perpendicular devido à orientação das moléculas e/ou fibras, de acordo com o analisado e determinado na análise de fluxo. Há dois componentes que determinam a orientação das moléculas: direção das moléculas na solidificação e tensão de corte nas moléculas na solidificação. Para polímeros reforçados com fibras, os efeitos de orientação são influenciados pelas fibras. Para os outros polímeros, a contração é mais significativa na direção do fluxo. Para polímeros reforçados, verifica-se uma maior contração perpendicularmente à orientação das fibras. Os efeitos de orientação são influenciados pelos seguintes fatores: localização do ataque e padrão de fluxo e balanço resultante; parâmetros de processamento – em especial o tempo de enchimento, a pressão e o tempo de compactação, e desenho e parâmetro do sistema de refrigeração.

A forma do empeno pode ser diferente consoante os efeitos de orientação. Na Figura 34 (a) pode ver-se a direção da orientação do fluxo na cavidade. Como o disco tem o ataque no centro (Figura 34 (b)), a contração paralela é elevada, o que resulta em a periferia contrair mais que o centro. Na Figura 34 (c), o empeno em forma de redoma é causado pela elevada contração perpendicular.

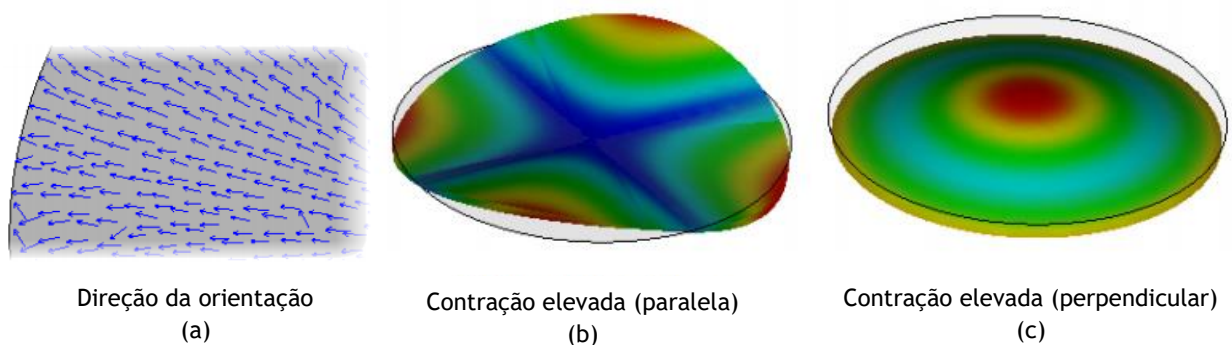


Figura 34 – Exemplo de efeitos de orientação [17]

O resultado da simulação de empeno mais significativo é [17]:

- **Deflexão** – todos os efeitos: desvio dimensional, em cada nó da malha, ao longo dos eixos, X, Y e Z. Este resultado apresenta a previsão do desvio e deformação total que pode ocorrer na peça. Esta funcionalidade irá decompor o resultado da deflexão total nos componentes de contração diferencial, de efeitos de orientação e de arrefecimento diferencial. Assim, é possível identificar o aspeto que mais contribui para a deflexão, o que permite a adoção medidas *a posteriori* para mitigar o empeno.

4. Trabalho prático desenvolvido

Como exposto ao longo do capítulo anterior, o *Moldflow* é, inequivocamente, uma ferramenta que, quando bem aplicada, traz benefícios de variadas naturezas aos construtores de moldes. Tendo em conta a exposição inicial sobre o avanço e inovação tecnológica constantes deste setor, surgiu a necessidade de apurar os fatores que levam o setor a não apostar (internamente) nesta ferramenta. Isto é, quando os clientes exigem um estudo *Moldflow* da peça, as empresas de moldes subcontratam esses estudos a gabinetes especializados. Para tal, inicialmente, pretendeu-se retratar o uso de aplicações CAE no setor através de um questionário (Anexo B).

Foram contactadas 43 empresas de moldes da região Norte (Ovar, Albergaria-a-Velha e Oliveira de Azeméis). Estes contactos produziram 4 questionários, dos quais 2 estavam incompletos. Perante a ausência de respostas, foi necessário alterar o plano de ação. Estes resultados não permitiram uma amostra suficientemente representativa. No entanto, considerou-se relevante referir alguns valores e apreciações dos construtores na secção “Ensaio e ajustes ao molde”.

Como tal, através da *NORCAM* verificou-se o interesse e disponibilidade da *Azemoldes*, que respondeu ao questionário, e agendou-se uma reunião. Dessa reunião foi possível acordar o fornecimento de uma peça para estudo e a colaboração da empresa na formulação de conclusões, através do auxílio em cálculos e uma análise SWOT de um hipotético investimento no *Moldflow*.

4.1. Apresentação da *NORCAM*

A *NORCAM - Engenharia e Design Industrial* foi fundada em 1991. A sua atividade comercial assenta no desenvolvimento, implementação e acompanhamento de soluções industriais, como sistemas CAD/CAM/CAE, impressão 3D, células robóticas, fabrico aditivo, entre outros meios tecnológicos avançados [18].

É através da experiência comprovada dos seus especialistas, que integram uma equipa multidisciplinar, que a *NORCAM* responde a problemas complexos de várias empresas, em diversos quadrantes do setor industrial espalhadas por três continentes [18].

4.2. Apresentação da *Azemoldes*

A *Azemoldes*, fundada em 1987, é uma empresa dedicada à produção de ferramentas e moldes para a indústria automóvel e de eletrodomésticos. Os moldes para peças de exterior, interiores e iluminação são especialidades da empresa, resultando numa elevada procura de alguns dos melhores fabricantes de eletrodomésticos europeus [19].

A empresa abarca todo o serviço de projeto, engenharia, produção, amostragem e assistência. Adicionalmente, colabora com o cliente durante o desenvolvimento da peça [19].

A produção diária integra desde protótipos e moldes de pequenas séries a moldes de produção de alto volume. A *Azemoldes* não se cinge à injeção tradicional, fornecendo soluções como injeção de dois componentes, duas cores, injeção assistida por gás, entre outras [19].

4.3. Estudo da peça

Seguindo o esquema sugerido pelos autores (Figura 29), analisou-se a sanidade do modelo CAD fornecido e criou-se uma malha 3D. Informação adicional sobre os tipos de malha e seu funcionamento pode ser consultada no Anexo E.

É importante referir que os resultados deste estudo foram comparados ao estudo que a *Azemoldes* subcontratou para esta peça.

4.3.1. Diagnóstico de espessura da malha

Gerada a malha, foi necessário determinar se a espessura da peça correspondia ao expectável. Verificou-se que a espessura se encontrava dentro das especificações do modelo CAD (Figura 35).

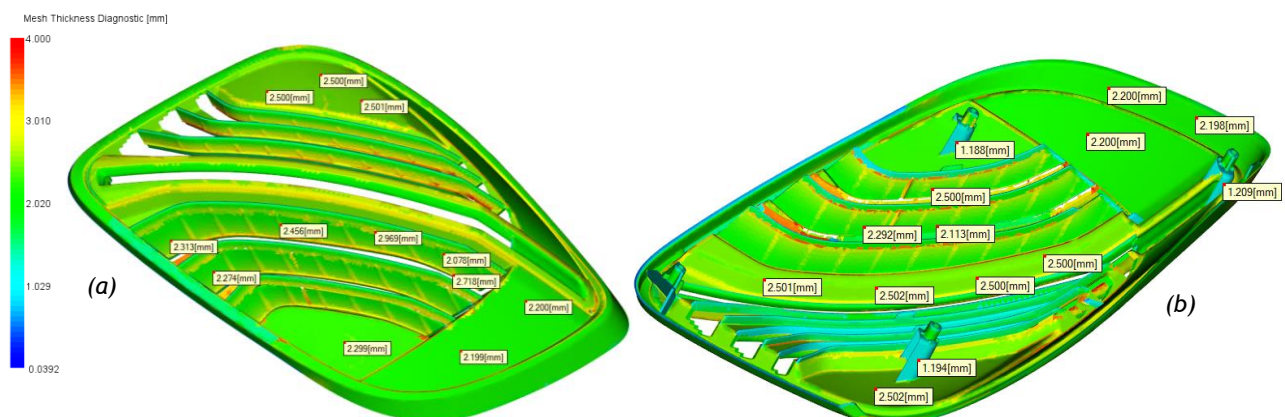


Figura 35 – Diagnóstico de espessura da malha; lado da cavidade (a) e lado do macho (b)

4.3.2. Material e parâmetros do processo

O material utilizado é um policarbonato, com estrutura amorfa e de designação comercial de *Makrolon*® 1260, fabricado pela *Covestro*. Este é caracterizado por possuir alta resistência ao impacto, mesmo a baixas temperaturas, e por ser leve. Apresenta alta estabilidade dimensional e é facilmente moldável (recomendado 80°C a 120°C), no entanto

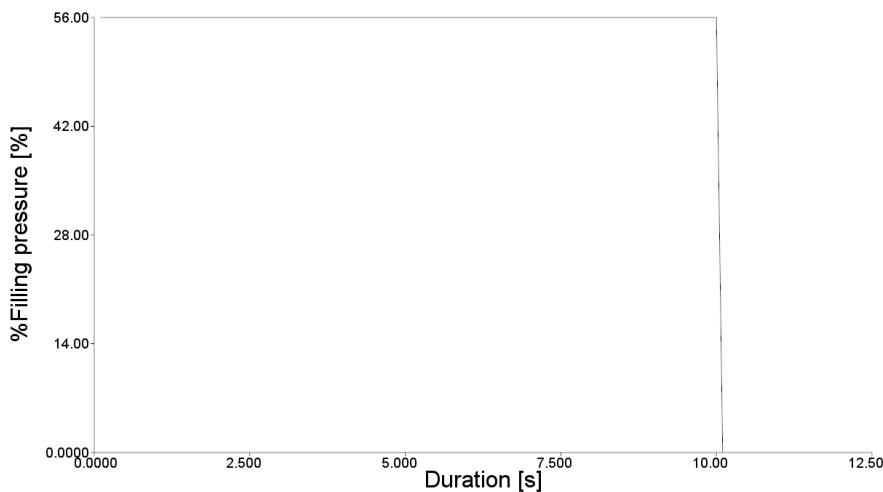
é igualmente resistente à temperatura, dado apresentar temperatura de transição vítrea até 148°C [20]. Informações sobre as propriedades térmicas e reológicas do material podem ser observadas no Anexo D.

Os parâmetros do processo foram fornecidos pela *Azemoldes*, como observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do processo

Tempo de injeção	2,1 s
Tempo de ciclo	30 s
Temperatura do fundido	300°C
Temperatura do molde	100°C
Ponto de comutação	98,5% do volume da cavidade

Em relação à compactação, foi aplicada uma pressão de 56 MPa durante sensivelmente 10 s. A Figura 36 (b) apresenta o *input* exato de valores.



(a)

Pack/Holding Control Profile Settings		
Packing pressure vs time		
	Duration s [0:3600]	Packing pressure MPa [0:500]
1	0.1	56
2	9.9	56
3	0.1	0
4		

Import Profile...

(b)

Figura 36 – Perfil de compactação. Gráfico (a) e controlo no *software* (b)

O Anexo F apresenta a parametrização da análise *Cool + Fill&Pack + Warp*.

4.3.3. Resultados da análise do Enchimento e Compactação

O enchimento teve a duração de 2,212 s, sendo possível notar aos 75% algum efeito *racetrack* (Figura 37 (a)) dado que as zonas mais espessas, centrais, enchem antes das zonas finas laterais [16]. Por outro lado, também existe hesitação no *boss* (Figura 37 (b)) para montagem, fazendo com que esse lado da peça encha mais lentamente.

Ao analisar a pressão na cavidade (Figura 38), deve procurar-se verificar se, na extremidade da peça, no final do enchimento, aos 2,2 s, não é exercida pressão. É possível confirmar que é isso o que ocorre, através da curva correspondente ao nó 281637.

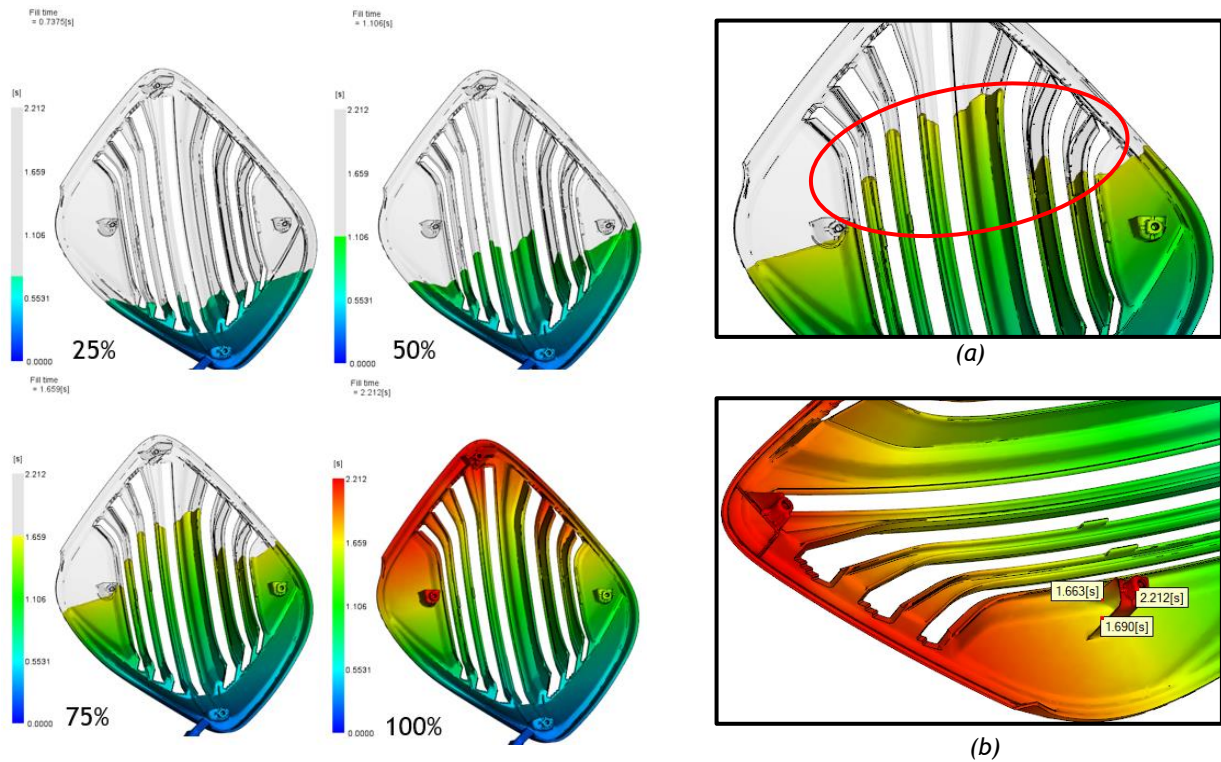


Figura 37 – Enchimento. Efeito *racetrack* (a) e hesitação no *boss* (b)

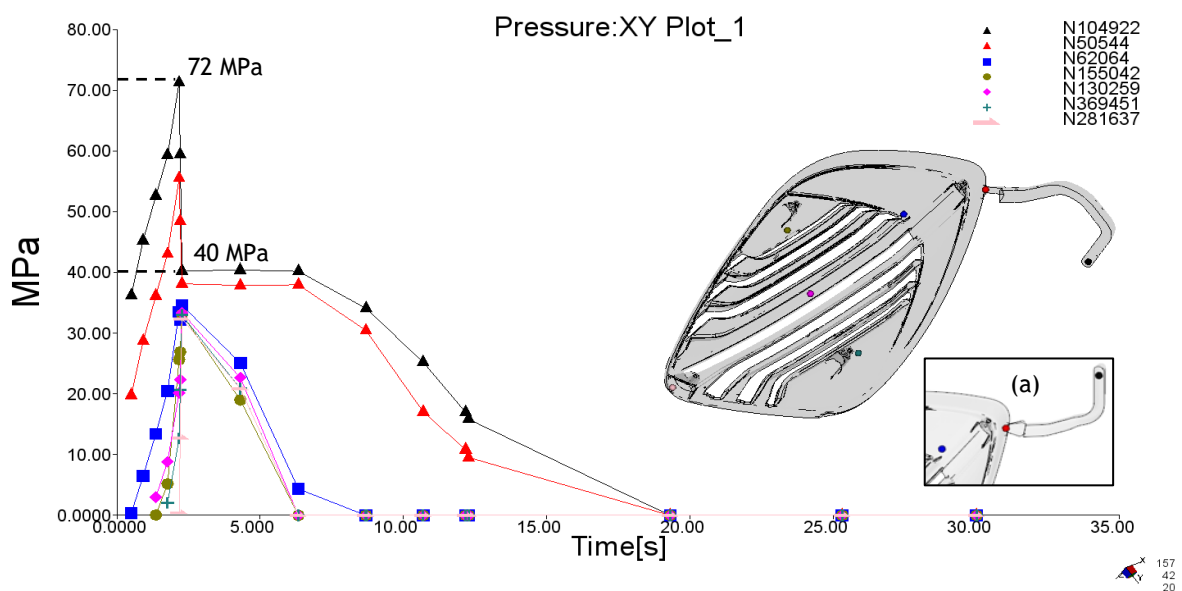


Figura 38 – Gráfico de pressão vs tempo em vários nós; (a) sistema de alimentação alterado no estudo subcontratado.

Sabe-se que, no ponto de comutação de 98,5% do volume, deveria registar-se uma queda de pressão de 72 MPa para o patamar definido no perfil de compactação de 56 MPa. Ao observar o gráfico da Figura 38, observa-se que tal não aconteceu. Isto significa que é necessário otimizar o ataque e/ou o sistema de alimentação, para que não haja perdas de pressão. O estudo subcontratado apresentava alimentação diferente (Figura 38 (a)).

A força de fecho deve confirmar que a força máxima atingida corresponde a não mais do que 80% da força máxima da máquina. A força máxima registada na simulação foi de 120 ton. No estudo subcontratado, esta foi de 159 ton. Este resultado é função da distribuição de pressão na cavidade, o que permite visualizar as diferentes etapas do ciclo (Figura 39).

A variação de temperatura na frente do fluxo é indesejável, por influenciar a viscosidade do material e, como tal, poder desequilibrar o fluxo ao longo da peça. A maior variação de temperatura na peça é de 25°C (Figura 40 (a)). No entanto, esta dá-se devido à hesitação mencionada anteriormente durante o enchimento. Na generalidade, a variação da temperatura ao longo da peça não é superior a 8°C, o que é um valor aceitável [14].

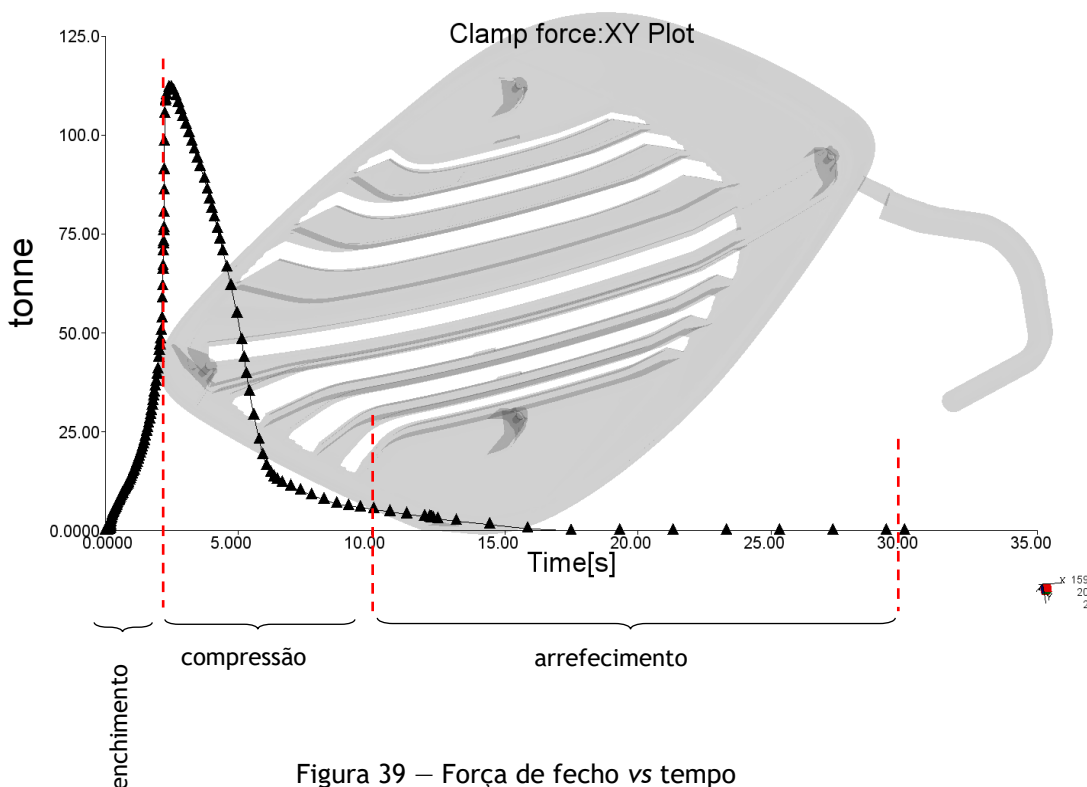


Figura 39 – Força de fecho vs tempo

A fração de camada solidificada não apresenta valores dignos de registo, sendo que os valores estão dentro do esperado: 0,15 a 0,25 [14]. Apesar de se verificar um arrefecimento mais rápido no *boss* mais próximo do ataque (0,993 de camada solidificada no final do enchimento), esta situação não originou problemas durante esta fase, nem na solidificação das restantes zonas (Figura 41 (a)).

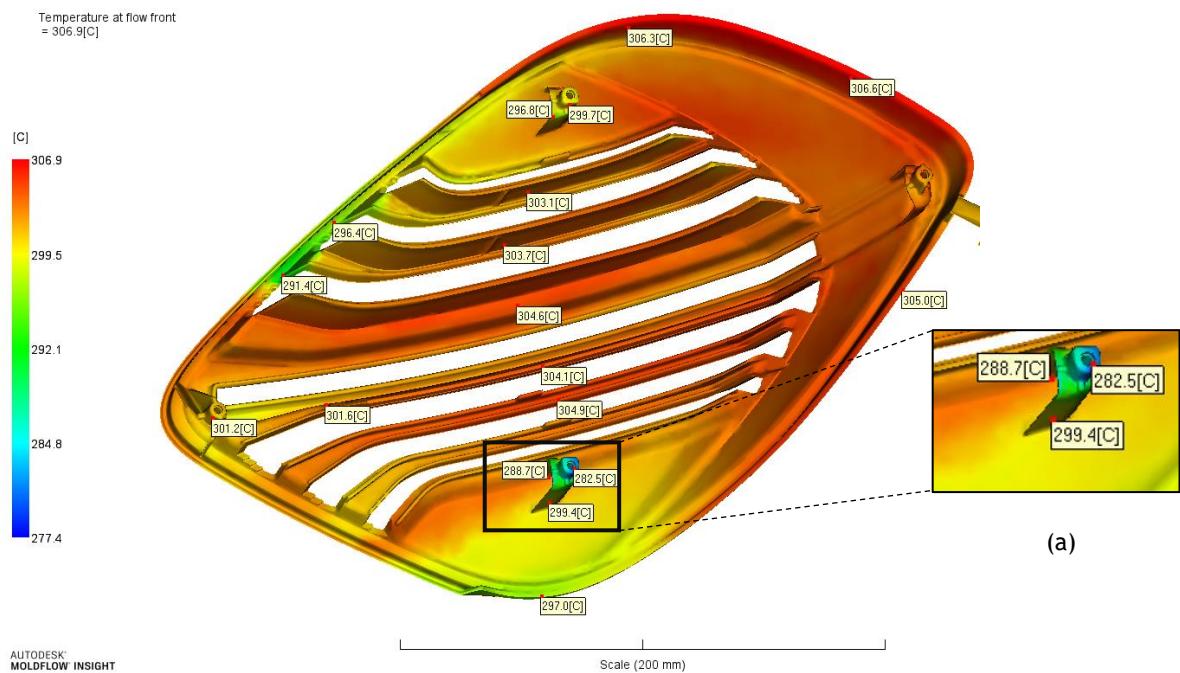


Figura 40 – Temperatura na frente de fluxo. Pormenor do boss para montagem (a)

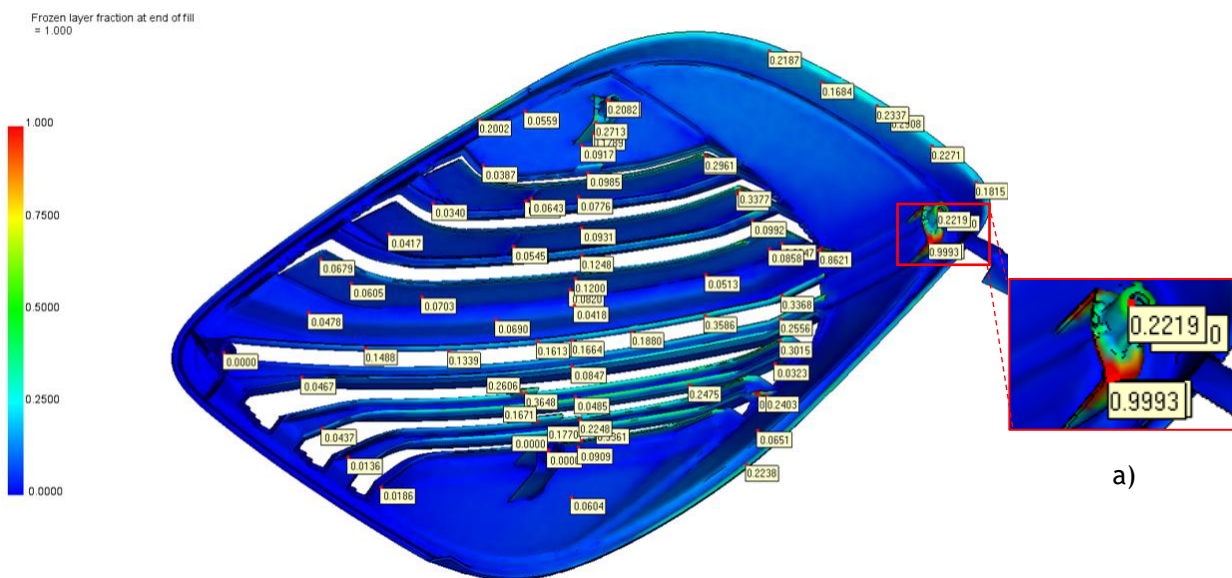


Figura 41 – Fração de camada solidificada no final do enchimento. Pormenor do boss para montagem próximo do ataque (a)

Através da funcionalidade de sonda no gráfico de contornos da contração volumétrica, podemos observar planos internos. Os *ribs* apresentam uma contração de até 10% no interior (Figura 42 (b)). Este valor é significativamente superior aos valores nos restantes *ribs* da peça.

O *boss* apresentado na Figura 42 (a) apresenta contração de até 9,7% (interior) e, em média, uma contração de 7%. Em concordância, também o *rib* mais próximo atinge os 10,2%. Este dado, assim como aquele que foi realçado anteriormente, é concordante com a hesitação observada no enchimento. Assim, pode ser necessário redimensionar o *boss* ou aumentar a pressão de compressão. Deste modo, podem evitar-se possíveis problemas na montagem da peça no farolim, mesmo que se trate situações improváveis.

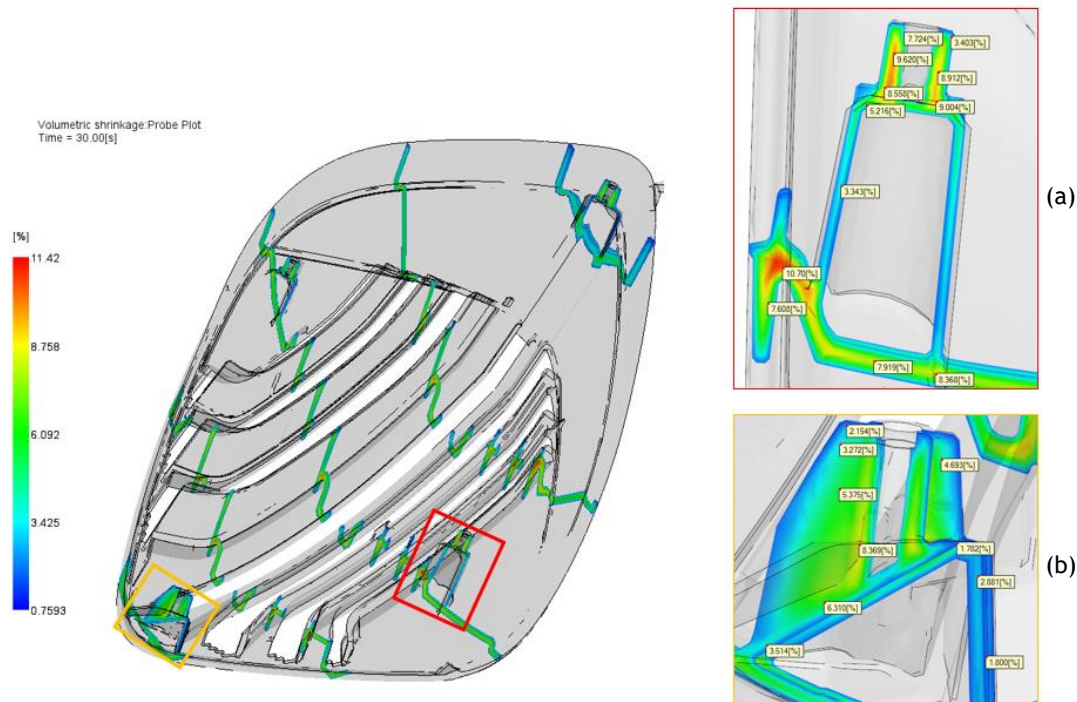


Figura 42 – Contração volumétrica na peça. *Boss* próximo do ataque (a) e *boss* no final da peça (b)

A contração volumétrica pode ser observada através de mapas de percentagem de contração. A Figura 43 permite observar que a contração aumenta tendencialmente para o lado direito da peça. Existe, pois, concordância em relação aos fenómenos descritos anteriormente no que diz respeito ao *boss* para montagem. Isto é, a contração é mais elevada na zona em que ocorre a hesitação. Assim, é aconselhável, se possível, que a espessura seja uniformizada, de modo a contrariar este fenómeno.

A contração média na peça é mais elevada do que os níveis recomendados de 5% [16]. Como é demonstrado pela Figura 44, vários nós da malha apresentam uma contração média superior ao recomendado, havendo, conseqüentemente, uma contração global na peça de cerca de 6%.

Por outro lado, verifica-se elevada propensão para a formação de prisões de ar em algumas zonas. Aí, é importante criar ventilação (Figura 45 (a)). Na Figura 45 (b), realça-se os valores que são atingidos: 0,8 a 1.

Por fim, a Figura 46 demonstra os ângulos de convergência de frentes de fluxo. Quanto maior o ângulo de convergência, mais visível é a linha de soldadura. É igualmente possível verificar que a maioria das linhas de soldadura se apresenta nos *bosses* e na zona mais

afastada do ataque, que tem muitas paredes, que são a causa do encontro das diferentes frentes de fluxo.

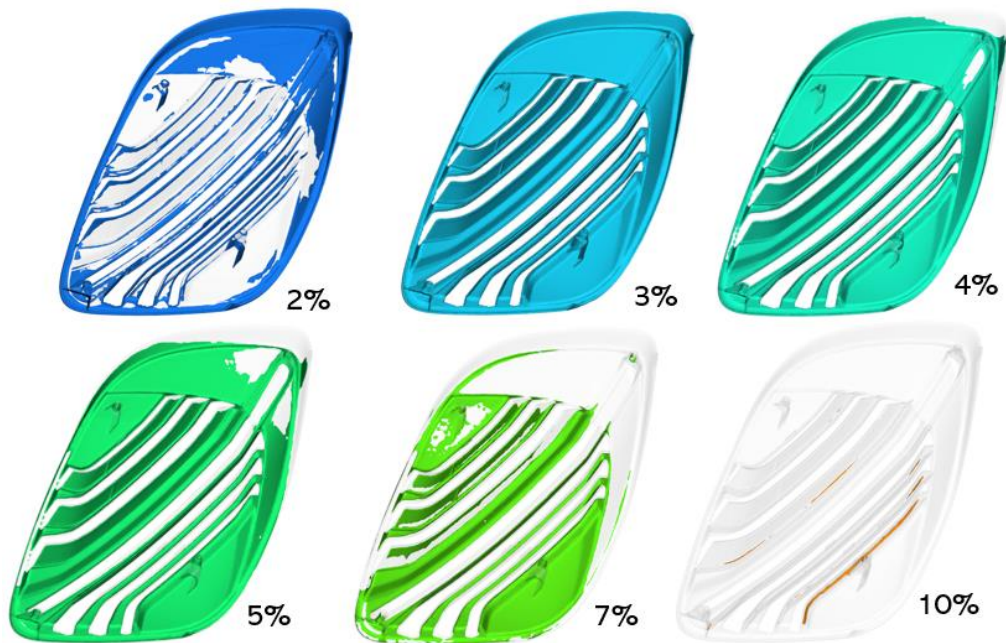


Figura 43 – Contração volumétrica na peça de acordo com diferentes percentagens

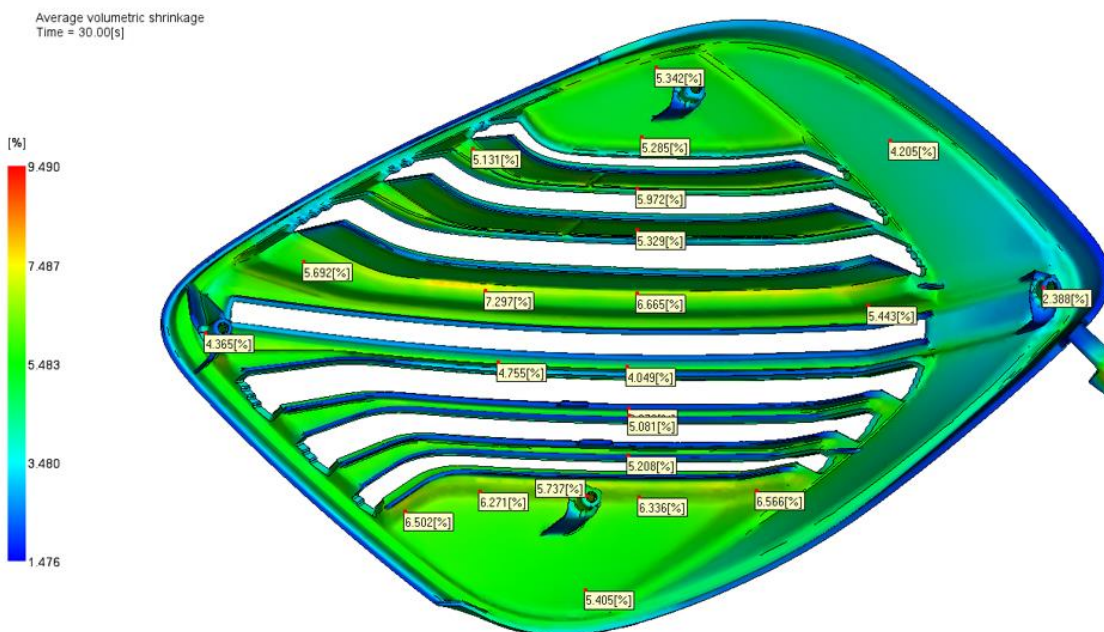


Figura 44 – Contração volumétrica média

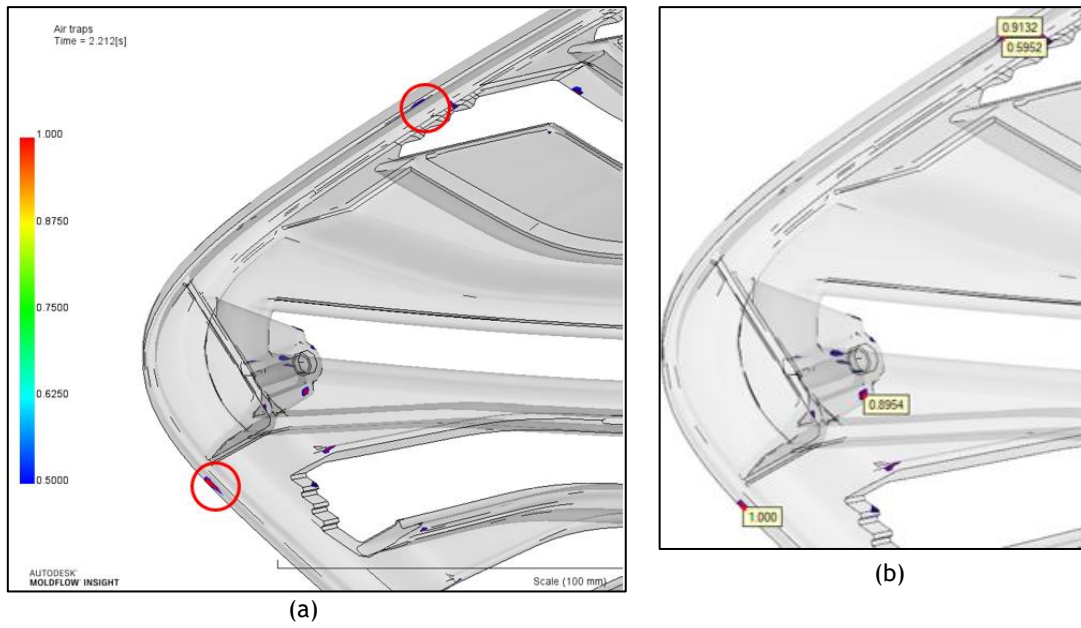


Figura 45 – Resultado prisões de ar.
 Locais indicados para ventilação (a) e probabilidade de aprisionamento de ar (b)

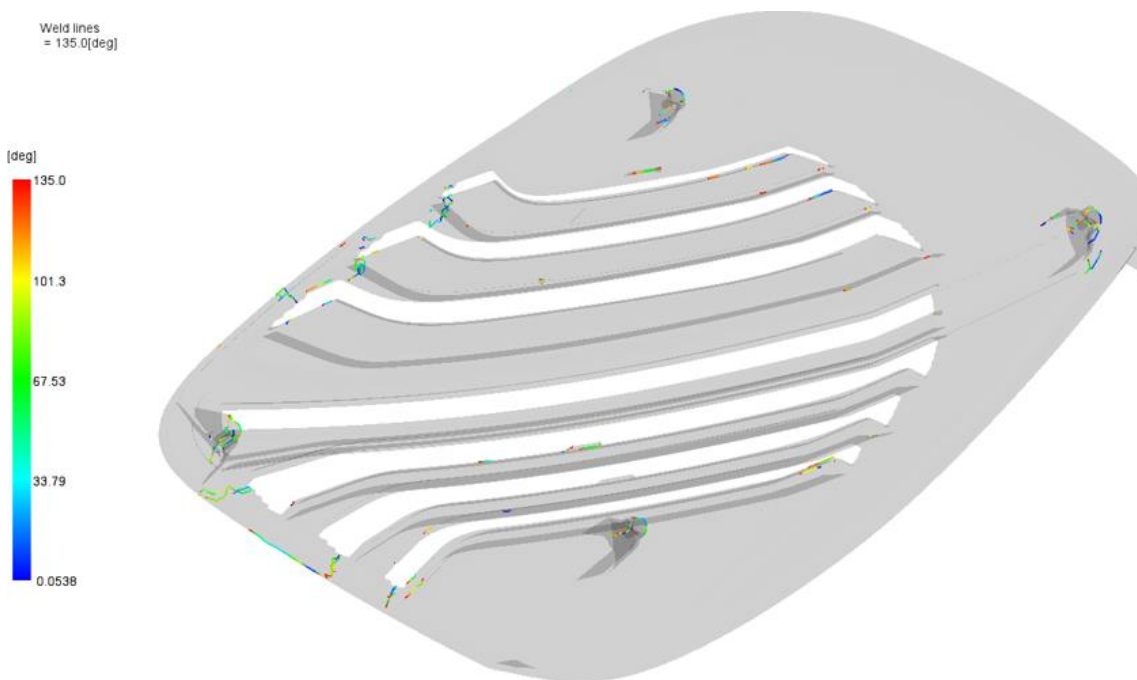


Figura 46 – Ângulos de convergência das frentes de fluxo. Resultado linhas de soldadura

4.3.4. Preparação da análise de arrefecimento

Para analisar o arrefecimento da peça, é necessário recriar os canais de arrefecimento. Isto pode ser feito manualmente; no entanto, a prática mais comum é importar curvas *IGES* desenhadas pelos projetistas de moldes, editá-las, atribuir a propriedade de “*cooling channel*” e indicar os nós que representam a entrada do líquido arrefecedor.

O Anexo E contém imagens do processo de edição dos canais de refrigeração.

Os parâmetros do sistema de refrigeração podem observar-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros dos canais de arrefecimento

Ø canais refrigeração	11 mm
Temperatura do líquido arrefecedor (água)	80°C
Fluxo	5 l/min

Concluída a preparação, pode gerar-se a malha do sistema de arrefecimento, representada por vigas, resultando no sistema apresentado na Figura 47.

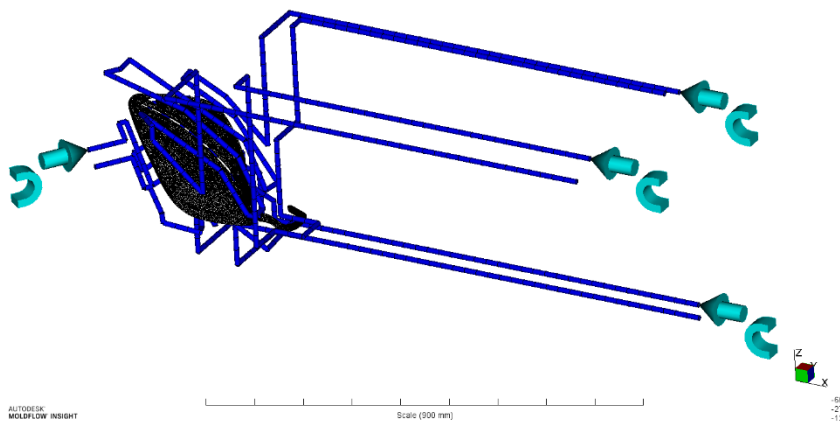


Figura 47 – Peça e sistema de arrefecimento representados por malha, antes de simulação

4.3.5. Resultados da análise de arrefecimento

Observando os resultados de arrefecimento, foi possível verificar que o circuito cumpre os requisitos necessários, quer a nível de fluxo quer a nível de temperatura. Deste modo, pode afirmar-se que o sistema de arrefecimento é eficaz, o que é sustentado pelos resultados apresentados em seguida.

A Figura 48 permite observar que o fluxo de 5 l/min do líquido resulta em 27 148 Re, valor muito acima do recomendado (10 000 Re).

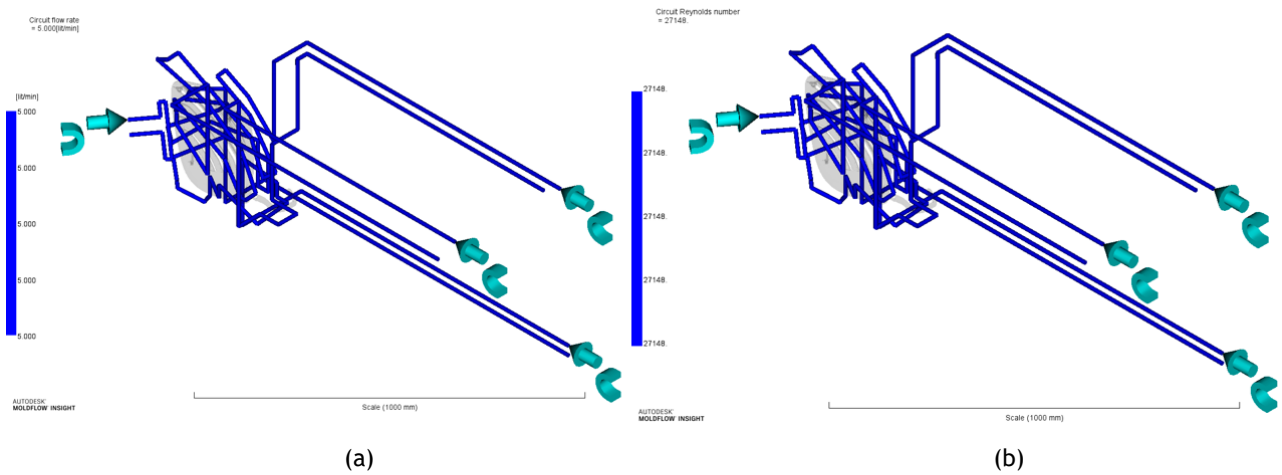


Figura 48 – Fluxo (a) e número de Reynolds (b) do circuito de refrigeração

A temperatura do líquido de arrefecimento (Figura 49) mantém alguma uniformidade, registando-se, na globalidade, valores de variação de temperatura do líquido arrefecedor de 2°C a 3°C. A temperatura do metal nos circuitos de refrigeração corrobora os dados anteriores, apresentando-se uma variação máxima de 1,6°C (Figura 50).

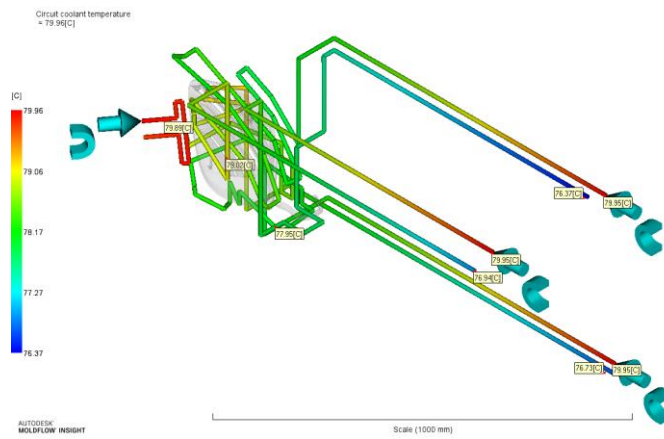


Figura 49 – Temperatura do líquido arrefecedor no circuito de refrigeração

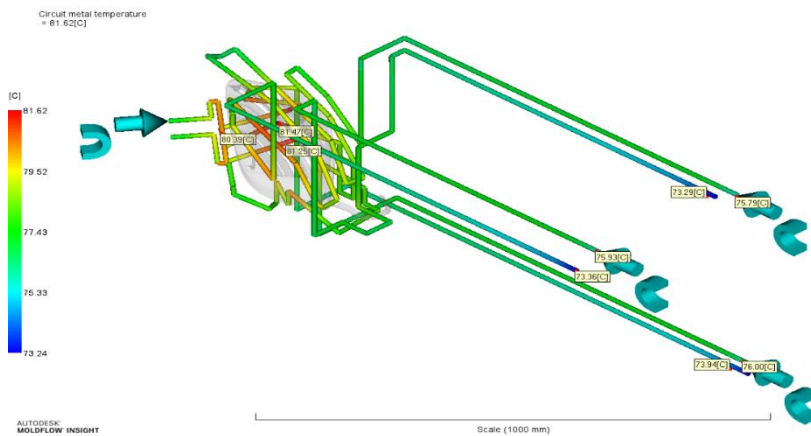


Figura 50 – Temperatura do metal dos canais de refrigeração

É através do resultado da temperatura do molde (Figura 51), em que a cavidade é representada pela peça, que se observa que, após o arrefecimento, ainda subsistem zonas que atingem os 110°C. Estas zonas caracterizam-se por serem geometricamente complexas e têm uma posição profunda no molde. Assim, é importante considerar alterações no circuito (adição de componentes para as zonas em causa, como pinos térmicos) [17].

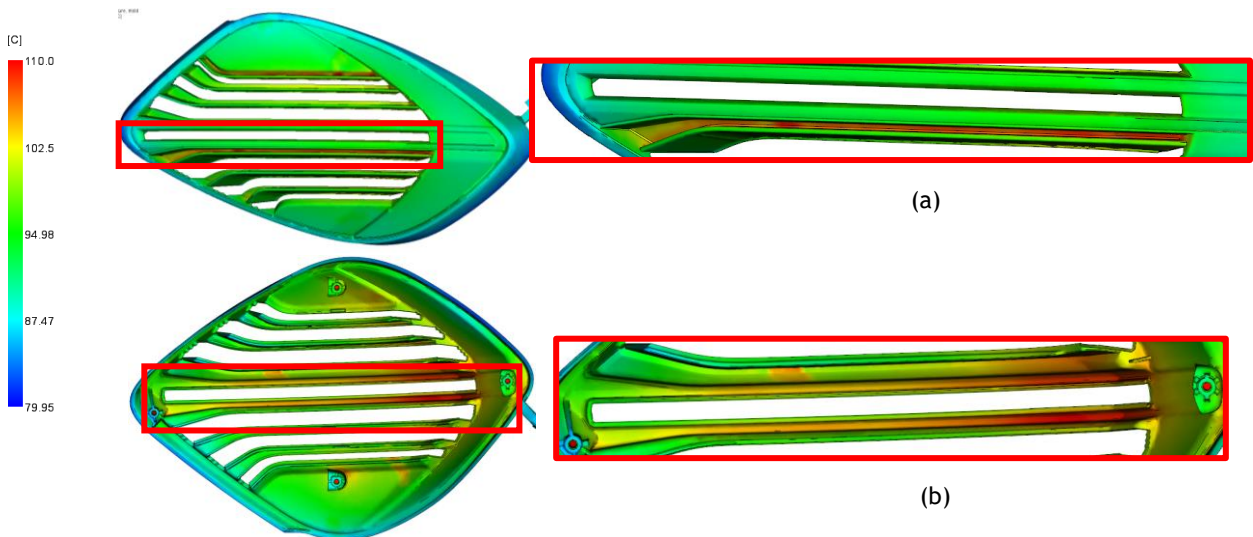


Figura 51 – Temperatura do molde.
Zonas quentes no lado da cavidade (a) e zonas quentes do lado do macho (b)

Analisando o tempo até se atingir a temperatura de extração (Figura 52), constata-se que, aos 2s, praticamente toda a camada exterior da peça se encontra à temperatura de extração. Embora existam ainda algumas zonas por arrefecer totalmente, aos 20s já a peça se encontra praticamente arrefecida na íntegra. Aos 25s, as zonas mais interiores podem ainda não ter atingido a temperatura de extração, o que é congruente com o resultado de temperatura no molde revisto acima.



Figura 52 – Tempo em que diferentes zonas atingem a temperatura de extração.

4.3.6. Resultados da análise de empeno

Para estudar o empeno, recorreu-se à visualização *best fit*, que ajusta o resultado tendo em conta os nós seleccionados pelo utilizador. Neste caso, foi essa a opção tomada, pelo que se utilizou todos os nós que representam a peça para o cálculo do empeno, ou deflexão.

Na Figura 53 pode ver-se que a peça apresenta valores nominais máximos de deflexão baixos na periferia (máximo de 1,53 mm): no entanto, tudo dependerá da tolerância exigida pelo cliente.

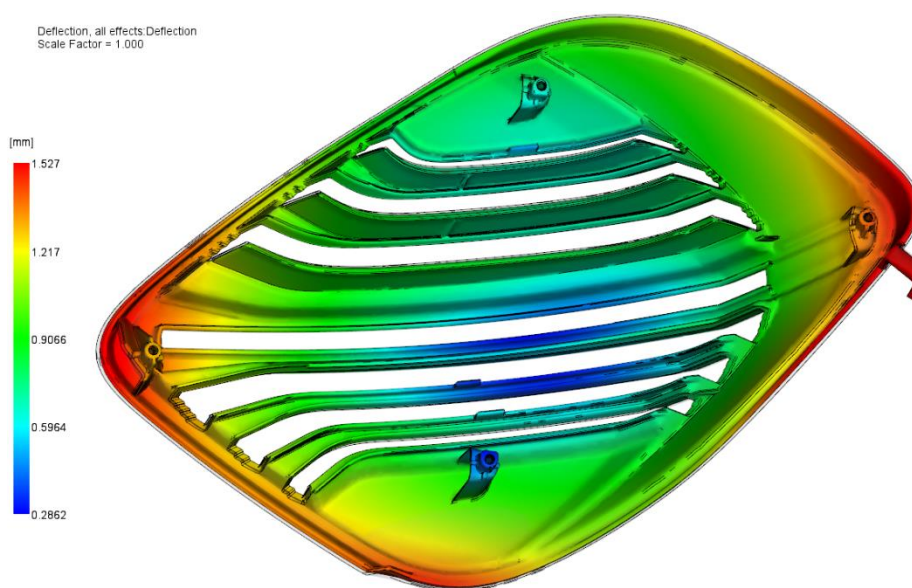


Figura 53 – Valores de deflexão – todos os efeitos

No Anexo G encontram-se os valores de deflexão de todos os efeitos, decompostos nas componentes X, Y e Z.

Para a componente X, por comparação com o estudo subcontratado, detetou-se um desvio de empeno de aproximadamente 0,25mm, sendo que o máximo nominal é 1,23mm (Figura G 1).

Para a componente Y, existe um desvio de empeno de aproximadamente 0,01mm, e o máximo nominal de 1,36mm (Figura G 2).

No caso da componente Z, o desvio é de aproximadamente 0,02mm, sendo o máximo nominal 1,50mm (Figura G 3).

Quanto a discernir qual o efeito que mais contribui para o empeno da peça, analisando os resultados para cada um dos efeitos, é possível isolar a causa mais provável do empeno.

Como é possível observar na Figura G 4, o arrefecimento diferencial contribui muito pouco para aquilo que é o empeno na peça. Pelo contrário, pode verificar-se que é a contração diferencial que se revela ser o fator que mais afeta a o empeno (Figura G 5). Apesar de a

magnitude do empeno ser muito baixa, caso seja do interesse reduzir o empeno, é necessário tentar uniformizar a contração, através da uniformização da espessura da peça. Esta alteração só pode ser feita por quem projetou e desenhou a mesma.

5. Implementação do *Moldflow*

5.1. Viabilidade financeira

Na sequência dos resultados obtidos pelo estudo realizado, para estudar a implementação do *Moldflow* na *Azemoldes*, decidiu-se avaliar a viabilidade financeira do investimento como fator complementar.

Este estudo de viabilidade financeira teve como objetivo analisar as despesas e receitas associadas ao **primeiro ano** do investimento em *Moldflow*.

Os custos estimados (Tabela 4) incidiram sobre:

- licença de *Moldflow Insight Standard*;
- instalação, manutenção, ações de formação e serviço pós-venda pelo revendedor português;
- vencimento de um técnico *Moldflow* e respetivos encargos sociais (Segurança Social, seguro de acidentes de trabalho, subsídio de alimentação, etc.);
- aquisição de um computador e mobiliário;
- despesas de eletricidade.

Tabela 4 – Custos associados ao primeiro ano de investimento

<i>Ativo</i>	<i>Ano</i>	<i>Mês</i>	<i>Hora</i>
Licença	14 635,00 €	1 219,58 €	6,93 €
Manutenção	3 500,00 €	291,67 €	1,66 €
Técnico MF	25 200,00 €	1 800,00 €	10,23 €
Computador	1 000,00 €	83,33 €	0,47 €
Eletricidade	600,00 €	50,00 €	0,28 €
Mobiliário	300,00 €	25,00 €	0,14 €
TOTAL	45 235,00 €	3 469,58 €	19,71 €

Além dos valores totais, é relevante analisar o custo de um estudo único, para haver um termo de comparação direto com o preço da subcontratação. Este valor pode ser obtido multiplicando o valor do custo por hora pelo tempo necessário para a realização de um estudo.

O cálculo para o tempo necessário para a realização de um estudo semelhante ao que foi elaborado no âmbito da dissertação pode ser analisado no Anexo H (Tabela H 1).

O valor para um estudo oscila entre os 532,17 € e os 729,27 €, dependendo do tempo despendido na realização do mesmo. Considerando que os estudos subcontratados têm um preço médio na região dos 2 000,00 €, estes valores representam apenas uma fração do preço dos estudos subcontratados – mais precisamente, de 27% a 37%.

Outra poupança interessante é a originada pela redução do número de ensaios necessário para obtenção da versão finalizada do molde. É importante referir que um molde terá de ser sempre ensaiado, uma vez que vender um molde não ensaiado é inconcebível. No entanto, será sempre recomendável reduzir o número de ensaios, por vários motivos. Em primeiro lugar, há empresas que não dispõem de injetoras capazes de ensaiar os moldes de modo representativo. Isto implica que, por vezes, o molde possa ter de ser transportado a centenas de quilómetros (de Oliveira de Azeméis até à Marinha Grande – e volta) mais que três vezes. Além do impacto financeiro, este aspeto tem repercussões negativas no tempo de fabrico, tornando-o mais prolongado. Em segundo lugar, reduzindo-se o número de afinações necessárias graças à riqueza dos dados fornecidos pelo *Moldflow* no tocante à injeção e à qualidade, poupa-se tempo, graças à redução do número de ensaios. Consequentemente, reduzindo-se o número de ensaios, reduz-se o número de ajustes, que podem implicar encargos de até 5 000,00 € por molde.

Conforme a Figura 27 ilustra, é possível haver uma redução no número de ensaios quando o estudo *Moldflow* é elaborado e analisado corretamente. A Tabela 5 apresenta a possível poupança em termos dos custos resultantes da realização de ensaios.

Tabela 5 – Possível redução de custos (em Euro) na realização de ensaios

	<i>Moldes Simples</i>			<i>Moldes Complexos</i>		
Custo/ensaio	150,00 €			750,00 €		
	Otimizado	Médio	Máximo	Otimizado	Médio	Máximo
Nº de ensaios	1	3	5	3	5	7
Custo	150,00 €	450,00 €	750,00 €	2 250,00 €	3 750,00 €	5 250,00 €
	Poupança máxima			Poupança máxima		
	80%			57%		

A análise da Tabela 5 baseia-se na informação cedida pelos construtores de moldes. É uma estimativa conservadora, dado que não inclui as reparações e ajustes ao molde, uma vez que o número de respostas aos inquéritos foi insuficiente – pelo que certamente haveria ainda maior poupança.

Para ilustrar algumas estratégias de poupança de custos em ensaios, consultou-se um estudo realizado por uma consultora de engenharia norte-americana, que afirma ter

obtido poupanças na ordem dos \$106 000,00 para um molde, depois de utilizar o *Moldex3D* [21]. Deste valor, \$7 200,00 resultaram da eliminação de 6 ensaios ao nível de processo, tendo-se evitado a produção de rebarbas; poupou-se \$33 000,00 em mão-de-obra, e na reparação do molde a poupança atingiu os \$60 000,00 [21].

O valor adicionado ao molde e à empresa traduz-se não só numa otimização do processo e da qualidade, mas também em faturação. Assim, analisou-se os possíveis ganhos, tendo em conta que a *Azemoldes* produz entre 50 e 60 moldes por ano e subcontrata estudos para cerca de 90% dos moldes que produz.

Assumi-se que um técnico dedicado ao *Moldflow* trabalha efetivamente cerca de 6 horas/dia (75% do seu horário). É possível que, fazendo estudos rigorosos nas três fases (orçamentação, projeto e ensaios/qualidade), consiga estudar pelo menos 43 a 59 peças/moldes por ano.

Estabeleceu-se dois cenários em que a *Azemoldes* adquiria uma licença *Moldflow Insight Standard*. Assumi-se que poderia faturar ao cliente os 2 000,00 € por estudo, independentemente de serem *in-house* ou subcontratados. No Cenário 1, a *Azemoldes* simula apenas os moldes mais complexos, e subcontrata 50% dos moldes produzidos a uma entidade externa. No Cenário 2, a *Azemoldes* simula todos os projetos, ou seja, 90% da produção (Tabela 6).

Tabela 6 – Faturação e lucro derivados da implementação de *Moldflow*

	<i>Nº de moldes</i>	<i>Valor faturado</i>	<i>Lucro</i>
Cenário 1	50	50 000,00 €	4 765,00 €
	60	60 000,00 €	14 765,00 €
Cenário 2	50	90 000,00 €	44 765,00 €
	60	108 000,00 €	62 765,00 €

É importante referir que o valor de um molde para a indústria pode ser vendido por valores que oscilam entre os 75 000,00 € e os 150 000,00 €. Isto significa que as poupanças e lucros apresentados representam ganhos marginais, na globalidade da faturação do ano. Ainda assim, 44 000,00 € a 62 000,00 € de potencial lucro, acoplado aos ganhos em tempo de projeto (comunicação interna, ao invés de comunicação com outras entidades) e redução de gastos relacionados com reparações ou ajustes da injeção e arrefecimento são fatores merecedores de consideração pelas empresas do setor de moldes.

6. Análise SWOT - “Implementação do Moldflow na Azemoldes”

A análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) é uma ferramenta útil no auxílio à tomada de decisões estratégicas em organizações. Através de uma análise concisa das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, é possível distinguir aquilo que a organização faz bem, e tirar partido disso. É possível reduzir a possibilidade de falha, entendendo aquilo que pode estar em falta, e evitar o insucesso através de perigos que possa haver na tomada de determinada decisão.

Idealmente, a análise SWOT deve ser realizada por um conjunto de entidades, dado que nem sempre é fácil às organizações (re)conhecer os fatores internos e externos envolvidos. Deve ter um objetivo claro, podendo eventualmente ser complementada por outras ferramentas de análise de negócio mais sofisticadas ou complexas na abordagem de um problema estratégico específico.

Assim, de modo simples e eficaz, pode a análise SWOT constituir um instrumento que viabilize o sucesso de uma estratégia que trará benefícios e destacará a organização no mercado em que se insere.

A tomada de decisão investigada pela análise realizada é a implementação de *Moldflow Insight* na *Azemoldes*.

A Tabela 7 lista os quatros fatores da análise SWOT identificados em conjunto com a *Azemoldes*.

Delimitado o âmbito da decisão a tomar e elencadas as forças e fraquezas da empresa, assim como as oportunidades e ameaças externas no mercado, é necessário completar a análise. Para tal, procede-se à identificação das forças que podem ser potenciadas e das fraquezas que podem ser antecipadas, com o objetivo de aproveitar as oportunidades, minimizando o impacto das ameaças.

Identificados os principais fatores que constituem as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, é necessário, de seguida, encontrar-se as sinergias entre estes eixos, para extrair o máximo potencial da análise SWOT.

Tabela 7 – Análise SWOT da empresa Azemoldes

Strengths – Forças	Weaknesses – Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> • <i>know-how</i> aliado a modernização tecnológica e capacidade de inovação; • compromisso com o cliente, cumprimento de prazos, moldes à medida, flexibilidade e resiliência negocial; • foco na satisfação do cliente a 100%; • equipas multidisciplinares com muita experiência (planeamento, projeto, programação, montagem); • fabrico de moldes complexos e diversos (<i>air•bags</i>, grupos óticos, grelhas, pilares). 	<ul style="list-style-type: none"> • processos de melhoria contínua e formação desajustados ao nível do planeamento e organização; • concorrência constrói moldes XL e XS, que não são uma oferta da <i>Azemoldes</i>; • pouca presença internacional nas áreas de negócio de injeção e fornecimento de produtos acabados.
Opportunities – Oportunidades	Threats – Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> • redução de custos em ensaios e ajustes ao molde; • possibilidade de margem de lucro na venda do estudo devido a custo baixo relativamente à subcontratação; • <i>Moldflow</i> é um <i>software</i> com muito legado e líder de mercado, os estudos são facilmente vendíveis; • melhor correlação dos estudos com a realidade traz melhor qualidade às peças e menor <i>lead time</i>; • diferenciação num mercado com muita concorrência de empresas de estrutura familiar e rígida; • eliminação de falhas e tempo de comunicação com entidades externas graças comunicação eficaz entre técnico de <i>Moldflow</i>, projetistas e produção; • realização e comercialização de estudos para fora da empresa. 	<ul style="list-style-type: none"> • implementação de <i>Moldflow</i> obrigará a mudanças de funcionamento interno da empresa podendo fragilizar procedimentos previamente estabelecidos; • <i>Moldflow</i> é o <i>software</i> mais complexo, com maior curva de aprendizagem, e cujos estudos são mais demorados e caros; • estudos podem passar a ser vistos como custo fixo, com possibilidade de oferta de estudos ao cliente; • estudo não corresponde às expectativas do cliente; • retorno do investimento não será imediato e levará meses a corresponder às expectativas da empresa; • deterioração de relações com gabinetes de estudos.

A introdução do *Moldflow* constituiria um fator diferenciador no mercado em que a *Azemoldes* se insere. A concorrência não dispõe desta inovação, a qual, aliada à experiência multidisciplinar e modernização tecnológica, traria uma vantagem competitiva no plano técnico e geraria, complementarmente, uma poupança pela redução de tempo e recursos.

Os engenheiros da *Azemoldes*, assim como os técnicos de injeção, possuem experiência na leitura e interpretação dos dados reológicos que os estudos subcontratados produzem. No entanto, não existe uma comunicação direta e constante entre os gabinetes contratados e a organização interna, nem tão pouco é possível do ponto de vista concorrencial fornecer toda a informação disponível internamente. Com um técnico *Moldflow* capaz, abrir-se-iam vias para um diálogo simples e presencial, potenciando o

entrosamento e a celeridade dos processos. A título de exemplo, para o estudo realizado ao longo do trabalho não foi possível introduzir todos os componentes do molde na simulação. Com um trabalho *Moldflow* presencial, todas as alterações ao molde, sistemas de elevada complexidade ou alterações ao projeto seriam comunicadas e esclarecidas *in situ*. Este fator elevaria a qualidade e correlação do estudo face ao processo real.

São observáveis fraquezas e ameaças que, quando combinadas, podem ter um impacto negativo acrescido. A título de exemplo, os processos de melhoria contínua e formação encontram-se desajustados, por um lado; por outro, a implementação do *Moldflow* pode ter um efeito disruptivo face à normalidade da empresa no que diz respeito a procedimentos e processos internos. O combate eficaz a esta ameaça clara passa pela cooperação entre a entidade formadora e a empresa. A comunicação e entendimento entre o revendedor português e a administração da *Azemoldes* resultaria numa planificação e organização ajustada às necessidades da empresa. Assim, solidificar-se-iam as competências dos colaboradores relevantes em *Moldflow*, contribuindo para uma transição suave de mentalidade, minimizando o período de adaptação da organização aos novos procedimentos.

As relações de confiança na *Azemoldes* são resultado de níveis máximos de satisfação do cliente. A possibilidade de cobrar estudos de moldes a (pelo menos) um preço idêntico àquele que é praticado pelos gabinetes subcontratados é uma oportunidade muito interessante para a empresa. Como revisto anteriormente, os estudos internos terão necessariamente maior correlação e reprodutibilidade nos ensaios, o que aumenta a qualidade dos resultados. Esta realidade é essencial para a manutenção e sedimentação das relações empresa-cliente. Neste caso, a margem de lucro possível estaria salvaguardada.

No entanto, a força e oportunidade acima mencionadas possuem uma ameaça correlativa: a de o cliente pretender negociar a oferta de estudos, argumentando que os mesmos representam um custo fixo. Esta situação pode gerar insatisfação no seio da empresa, pela possibilidade de ver uma parte do investimento não capitalizada. Este cenário pode ser contrariado através da elaboração e comercialização de estudos de peças para outras entidades empresarias, que não os clientes que encomendam moldes. Como complemento, pode dar-se ao cliente a opção de pagar um estudo subcontratado, sensibilizando-o para as vantagens da contratação de um estudo interno.

7. Conclusões

A implementação do *Moldflow* na indústria de moldes foi abordada através da análise de uma peça na indústria automóvel complementada por um estudo de cariz financeiro e uma análise SWOT.

O estudo *Moldflow* realizado obteve resultados muito aproximados aos obtidos pelo gabinete subcontratado aquando do fabrico do molde. Esta circunstância é reveladora de uma boa parametrização da malha e do processo.

Os resultados revelaram também que existem áreas a melhorar – em primeiro lugar, no próprio desenho da peça, desde logo porque, durante a injeção, o fluxo não apresenta uniformidade ideal em toda a peça, dando lugar a hesitações que podem ter consequências ao nível da qualidade estética. Havendo espaço para a otimização do desenho da peça, os resultados não indicam que deva haver uma alteração drástica.

A intervenção relevante dos moldistas pode passar pela tentativa de diminuição da contração volumétrica. A nível global, a contração volumétrica pode ser reduzida ainda mais significativamente através da modificação do *design*, de modo a minimizar os efeitos causados pela(s) hesitação(ões).

No entanto, não havendo essa possibilidade, os moldistas poderiam proceder a modificações ao sistema de arrefecimento – através, por exemplo, da colocação de pinos térmicos (ou outros auxiliares), de modo a minimizar o efeito do arrefecimento diferencial na contração volumétrica.

A análise financeira complementar ao estudo foi feita em duas vertentes. A primeira, decorreu dos cálculos dos custos associados à implementação de uma licença *Moldflow Insight Standard* na *Azemoldes*. Os custos por estudo diminuíram, aproximadamente, para valores situados entre os 27% a 37% do custo de subcontratação.

A segunda vertente foi calculada através dos dados obtidos por respostas ao questionário, e incidiu sobre a poupança relativa pela minimização de ensaios. Daqui, retiraram-se poupanças relativas máximas ideais de 80% para moldes simples e de 57% para moldes mais complexos, que, naturalmente, requerem mais ensaios.

Escrutinaram-se, finalmente, dois cenários de faturação ao cliente, com base na produção média da *Azemoldes* e com base nos valores atuais aproximados de faturação de estudos ao cliente. No primeiro cenário, seriam realizados estudos sobre apenas 50% da produção total, sendo o resto mantido no atual regime de subcontratação. Com base nestas premissas, seria possível extrair lucros entre os 4 765,00 € e os 14 765,00 € (valores aproximados). No segundo cenário, a *Azemoldes* assumiria a realização dos estudos com a sua prática atual de subcontratação, ou seja, 90% da produção. Neste, seria possível extrair lucros de aproximadamente 44 765,00 € a 62 765,00 €. Realça-se que estes valores só poderiam ser alcançáveis caso fosse possível cobrar aos clientes um valor idêntico (ou semelhante) ao imputado a estudos subcontratados.

Para abordar uma decisão de aquisição de licença e implementação do *software* fundamentada numa visão estratégica, procedeu-se a uma análise SWOT, da qual se concluiu que não é possível distinguir claramente a decisão a tomar no que diz respeito à implementação de *Moldflow*. Por um lado, o investimento financeiro é fácil de estruturar e prever; por outro, o investimento em formação de recursos humanos e o tempo necessário até os processos decorrerem como esperado, trazendo uma verdadeira vantagem competitiva à empresa, é indeterminado. As potenciais consequências das ameaças apontam para um impacto negativo superior ao impacto positivo das oportunidades que possam ser capitalizadas – nomeadamente, a possibilidade de haver uma disrupção dentro da *Azemoldes* que crie entropia nos processos e acabe por anular os benefícios e a celeridade do fabrico e projeto.

A *Autodesk* tem adotado uma nova abordagem ao disponibilizar o *Fusion 360* como centro de soluções diversificadas nos domínios do desenho, manufatura e engenharia assistida por computador. Deste modo, o *Fusion 360* tem vindo a expandir a sua utilidade a um leque mais amplo de indústrias, e como tal, é de prever que a *Autodesk* venha a integrar o *Moldflow* como extensão no *Fusion360*, alterando, assim, o enquadramento da análise SWOT para um cenário bastante mais favorável à introdução desta ferramenta numa empresa como a *Azemoldes*.

8. Perspetivas para trabalhos futuros

O *Moldflow* é uma ferramenta CAE cujos resultados dependem de uma abordagem séria e estratégica por parte de todos os interessados. Caso uma simulação tenha em conta todos os parâmetros envolventes, de modo a reproduzir o processo na realidade, terá muito maior probabilidade de sucesso do que uma simulação efetuada sem que sejam introduzidas todas as condições possíveis de computar.

A indústria de moldes – e em especial as pequenas e médias empresas de estrutura familiar – beneficiaria em proporcionar um trabalho presencial para o estudo comparativo entre o *input* no *software* (idealizado) e o processo real.

Em condições de trabalho ideais, com acesso a todos os dados do molde, desde o projeto à presença em ensaios, seria possível verificar os passos a tomar para aproximar estudos futuros à realidade. Através deste trabalho, seria possível identificar as falhas nos estudos e otimizar futuros estudos.

As potencialidades do *Moldflow* poderiam, assim, ser aprofundadas em pormenor com o máximo de informação e conteúdo prático industrial recolhido e analisado junto dos técnicos, baseado em experiências realizadas em condições controladas.

9. Bibliografia

- [1] “Injection Molding Machine,” Brick Fetish, [Online]. Available: http://brickfetish.com/photos/things/injection_1949.html. [Acedido em 1 dezembro 2020].
- [2] CEFAMOL, “CEFAMOL - Associação Nacional da Indústria de Moldes,” 2017. [Online]. Available: <https://www.cefamol.pt/index.php?id=29>. [Acedido em 28 novembro 2020].
- [3] CEFAMOL - Associação Nacional da Indústria de Moldes, “Report '20,” CEFAMOL, Marinha Grande, 2020.
- [4] W. Calister e D. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 8 ed., EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [5] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton e H. Ryffel, *Machinery's Handbook*, 26 ed., EUA: Industrial Press, Inc., 2000.
- [6] E. A. Campo, “Complete Part Design Handbook - For Injection Molding of Thermoplastics,” 2006. [Online]. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004X3GR1/complete-part-design/classification-polymers>. [Acedido em 5 dezembro 2020].
- [7] EUROPLAS, “PE, PP, LDPE, HDPE, PEG - What exactly plastic masterbatch is made out of?,” [Online]. Available: <https://europlas.com.vn/pe-pp-ldpe-hdpe-peg-plastic-masterbatch/>. [Acedido em 7 dezembro 2020].
- [8] Omnexus. The material selection platform, “Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features,” [Online]. [Acedido em 7 dezembro 2020].
- [9] Market Research, “Global Automotive Plastics Market Trends, Applications, Analysis, Growth, And Forecast: 2018 To 2027,” [Online]. Available: <https://marketresearch.biz/report/automotive-plastics-market/>. [Acedido em 7 dezembro 2020].
- [10] Engineering 360, “Thermoplastic composites for aerospace applications,” [Online]. Available: https://insights.globalspec.com/images/assets/596/12596/thermoplastic_composite_parts_aerospace-fullsize.png. [Acedido em 7 dezembro 2020].
- [11] R. J. Crawford, *Plastics Engineering*, EUA: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [12] S. Kulkarni, *Robust Process Development and Scientific Molding*, Alemanha: Hanser Publisher, 2017.

- [13] A. P. Gomes, “Análise do Processo de Injeção Verificando a Relação entre a Capabilidade das Variáveis e a Qualidade da Peça,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2018.
- [14] J. Shoemaker, Moldflow Design Guide, EUA: Moldflow Corporation, 2006.
- [15] A. M. A. P. M. Madeira, “Metodologia para Parametrização dos Componentes do Balancé no Projeto de Moldes para Injeção de Plástico,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2019.
- [16] I. Autodesk, Autodesk Moldflow Insight Fundamentals - Theory and Concepts Manual, Califórnia, EUA: Autodesk, Inc. , 2020.
- [17] Autodesk, Inc., Autodesk Moldflow Insight Advanced Cool and Warp - Theory and Concepts Manual, Califórnia, EUA: Autodesk, Inc., 2020.
- [18] Norcam - Engenharia e Design Industrial, “Norcam,” [Online]. Available: <https://www.norcam.pt/sobre/>. [Acedido em 28 fevereiro 2021].
- [19] Azemoldes, “Azemoldes Molding Technology,” [Online]. Available: http://www.azemoldes.pt/en/molding_automotive.m2/azemoldes.48/azemoldes_molding_technologies.a55.html. [Acedido em 28 fevereiro 2021].
- [20] Covestro, “Covestro Solution Center,” [Online]. Available: <https://solutions.covestro.com/en/brands/makrolon>. [Acedido em 27 fevereiro 2021].
- [21] Shape corp, “Moldex3D,” 21 outubro 2014. [Online]. Available: https://www.moldex3d.com/en/blog/customer_success/cost-and-time-saving-strategies-using-moldex3d-to-make-better-decisions-on-product-design-and-optimization/. [Acedido em 29 março 2021].
- [22] S. Kulkarni, Robust Process Development and Scientific Molding, 2 ed., Cincinnati: Hanser, 2016.
- [23] J. Shoemaker, Ed., Moldflow Design Guide, Cincinnati: Hanser, 2006, pp. VII - VIII.
- [24] Moldex3D, “LinkedIn - Moldex3D Europe,” [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/moldex3deurope_empoweryoursimulation-moldex3d-moldex3deurope-activity-6768430322179694592-Kh6K. [Acedido em 25 fevereiro 2021].

Anexo A – Defeitos mais comuns em peças injetadas

Prisões de ar

As prisões de ar são moléculas de ar aprisionadas na cavidade moldante. Surgem devido a fluxos de polímero convergentes ou ventilação insuficiente e ocorrem tipicamente nos últimos locais a ser preenchidos. Este defeito poderá causar vazios ou bolhas no interior da peça, falta de enchimento ou defeitos superficiais como queimaduras [14].

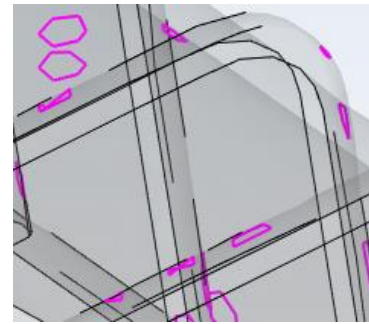


Figura A 1 – Prisões de ar em simulação *Moldflow Adviser*

Fragilização

Encontrando-se fragilizada, a peça irá quebrar ou degradar-se facilmente. Pode dar-se o caso de as cadeias moleculares serem mais curtas do que o antecipado, levando a um menor peso molecular. As propriedades mecânicas da peça serão inferiores ao previsto. Pode ser causada por má definição de temperatura, concepção de ataques e sistema de distribuição defeituoso, linhas de soldadura, entre outros [14].



Figura A 2 – Ilustração de peça que parte por fragilização

Queimaduras

São pontos ou manchas negras que aparecem nas extremidades das peças, podendo dar-se em zonas onde existem prisões de ar ou por causa de excesso de temperatura no fluxo, excesso de velocidade de rotação do parafuso e restrições no caminho de fluxo [14].

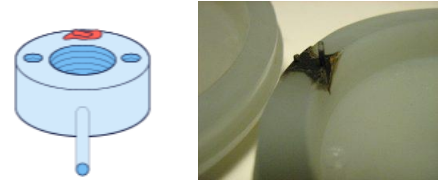


Figura A 3 – Exemplo de queimaduras

Variação dimensional

Fala-se de *variação dimensional* quando se detetam diferenças nas dimensões de peças do mesmo lote, em ciclos diferentes. Pode ter origem no controlo instável da máquina, condições de moldação impróprias ou propriedades do material inconstantes, entre outros [14].

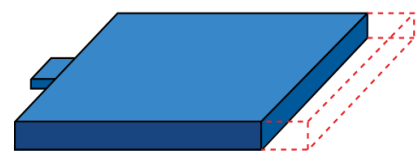


Figura A 4 – Ilustração de variação dimensional

Hesitação

É um defeito superficial resultante da estagnação do fluxo numa secção fina, ou secção de variação de espessura abrupta. Pode ser evitada através da mudança da espessura da peça ou mudança da disposição dos ataques. É uma causa frequente das prisões de ar e linhas de soldadura [14].

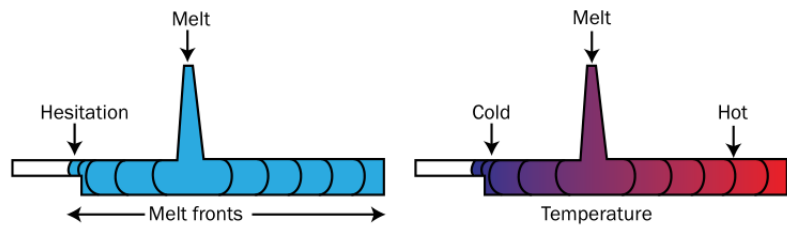


Figura A 5 – Formação de uma hesitação.

Rebarbas

Rebarba é o excesso de material nos locais onde o molde se separa, nos locais de junção de material – como ataques, canais de distribuição ou locais de ejeção. Algumas das causas são espaços entre o molde, condições de moldação impróprias ou ventilação imprópria [14].

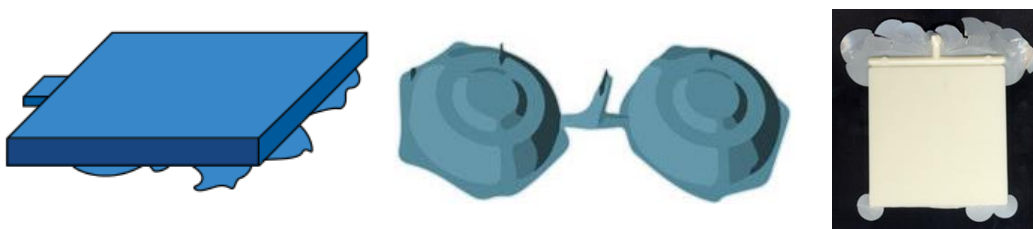


Figura A 6 – Exemplo de rebarbas

Abatimento superficial e vazios

O abatimento superficial é uma depressão superficial localizada tipicamente em zonas mais espessas, ou acima de locais acima de nervuras, ou *fillets* internos. Um vazio, por seu lado, é uma bolha de vácuo interna. Estes defeitos são causados por contração do material, quando zonas espessas não são suficientemente bem alimentadas durante o arrefecimento da peça – isto é, por remoção não uniforme de calor, por baixa pressão na injeção ou pressurização, ou por tempo de arrefecimento insuficiente [14]. Devem ser combatidas com *design* eficiente.

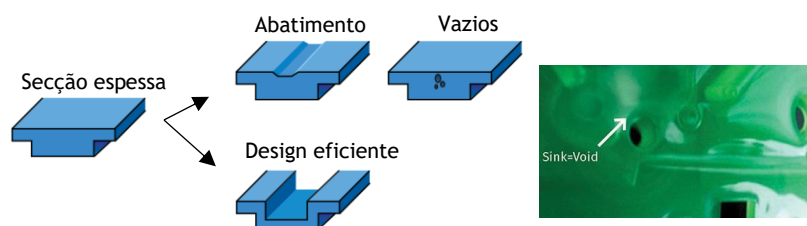


Figura A 7 – Abatimento superficial e vazios.

Linha de soldadura

Uma linha de soldadura forma-se quando duas frentes de fluxo distintas, que se movem em direções opostas, se encontram. Em alguns casos, quando o ângulo a que se encontram é superior a 135°C , as frentes unem-se. Ambos os fenómenos se dão quando as frentes encontram obstáculos à sua passagem como furos, insertos, espessura de parede variável, entre outros [14].

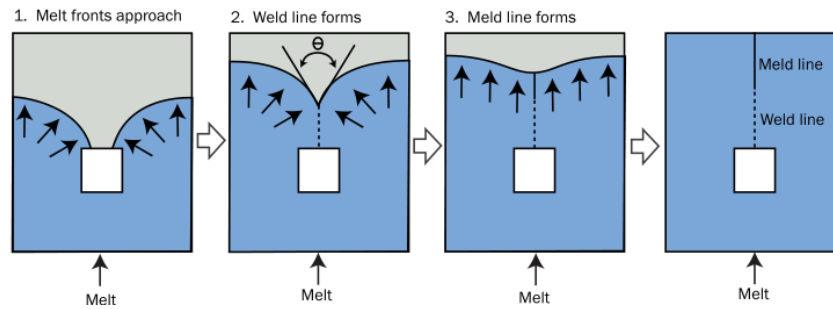


Figura A 8 – Formação de linhas de soldadura.

Anexo B – Questionário para as empresas da indústria de moldes

1. INFORMAÇÃO DA EMPRESA

Nome _____

Nº de colaboradores _____ Nº de postos CAD/CAM/CAE _____

2. ATIVIDADE E VENDAS

2.1. A atividade da empresa inclui:

Projeto de moldes Fabrico de moldes Comercialização de moldes

2.2. Indique o tempo médio dedicado às seguintes etapas:

Projetar o molde demora _____ dias

Maquinar o molde demora _____ dias

Ajustar o molde após fabrico demora _____ dias

Ajustar o molde após ensaios demora _____ dias

2.3. A empresa consegue produzir moldes em simultâneo.

3. ENSAIOS

(Esta secção destina-se aos moldes que a empresa produz especificamente para a indústria de injeção de plástico)

3.1. A empresa é capaz de realizar ensaios *in house*? Sim Não

3.2. Qual o custo médio de um ensaio (próprio ou subcontratado)? euros

3.3. Quantos ensaios são necessários para completar o processo, do fabrico até à venda do molde? ensaios

3.4. Qual o tipo de ajustes tipicamente realizados após o primeiro ensaio? Estão relacionados mais com a injeção ou construção do molde?

3.5. Qual o custo médio desses ajustes (após primeiro ensaio)? euros

3.6. Qual o custo médio de todos os ajustes, após todos os ensaios terem sido realizados? euros

3.7. Já tiveram necessidade de mudar completamente o local de injeção ou canais de arrefecimento após o fabrico de um molde? Quais as principais causas que levaram a essas alterações?

3.8. Quando um molde requer um sistema de injeção interno, a ser controlado eletronicamente, a empresa:

Produz e monta o sistema _____

O cliente envia o sistema e a empresa faz a montagem _____

A empresa não fabrica moldes com essa necessidade _____

4. USO DE SOFTWARE DE SIMULÇÃO DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO

4.1. Possuem licença para algum software?

Autodesk Moldflow _____ Não _____ Outro _____ Qual? _____

4.2. Se **SIM**, qual o motivo pelo qual optaram especificamente por esse software e não outro?

4.3. Se **NÃO**, já consideraram a aquisição de licenças? Quais os motivos pelos quais optaram por não adquirir?

4.4. De modo geral, considera o **MOLDFLOW** benéfico e capaz de solucionar algum dos problemas com os quais a Indústria de moldes se depara?

4.5. Indique, se possível, em percentagem, a frequência com que:

O cliente fornece estudo Moldflow com a encomenda _____ %

O cliente não fornece o estudo, mas exige que haja um estudo da parte da
nossa empresa (ou subcontratado) para avançar com a encomenda _____ %

O cliente não fornece nem exige um estudo Moldflow _____ %

4.6. Qual o custo médio de um estudo Moldflow subcontratado? euros

4.7. Considera que os resultados dos estudos que lhe foram fornecidos foram
capazes de produzir algum benefício, ou vantagem prática e económica? Em
que medida?

Muito obrigado pela sua colaboração!

3

Figura B 3 – Questionário para as empresas de moldes, p. 3

Anexo C – Análise FEA e tipos de malha

A análise por elementos finitos (FEA) assenta no princípio da substituição de um problema complexo por um, ou vários, problemas simples. Dado que o problema é substituído por uma simplificação, para a maioria dos casos práticos reais as ferramentas matemáticas atuais limitam-se a apresentar soluções aproximadas, não exatas. No entanto, é possível melhorar ou refinar a solução aproximada aplicando mais esforço computacional. Na análise por elementos finitos, a região de solução é considerada um conjunto de pequenas sub-regiões interligadas denominadas “elementos”. Os elementos são definidos no espaço por nós, que contém informações como coordenadas, valores de propriedades em estudo, entre outros. Para que o *Moldflow*® possa efetuar uma simulação ou análise, é necessário que o modelo apresente uma malha de elementos finitos (ou simplesmente “malha”) apropriada.

Existem três categorias principais de elementos:

- **Viga** – elementos de dois nós usados para descrever os canais de distribuição, canais de arrefecimento, entre outros;
- **Triângulo** – elementos de três nós usados para descrever as peças, moldes, entre outros;
- **Tetraedro** – elementos de quatro nós usados para descrever as peças, machos, sistemas de alimentação, entre outros.

A Figura C 1 apresenta os três tipos de elementos usados no *Moldflow*.

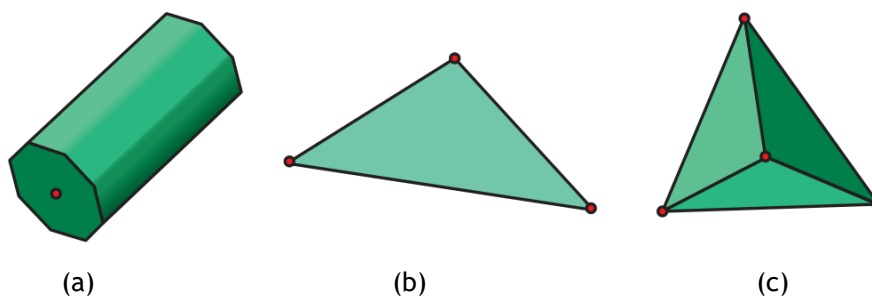


Figura C 1 – Elementos finitos em *Moldflow* - (a) viga; (b) triângulo e (c) tetraedro.

A análise *Moldflow*® usa três tipos de malhas que são apropriadas para os diferentes níveis de precisão de análise escolhida pelo utilizador. Uma malha mais precisa na definição das

diferentes regiões exige mais esforço computacional, e vai levar a uma análise mais demorada.

Os três tipos de malha existentes, por ordem de precisão crescente são *Midplane*, *Fusion* e 3D. A Tabela C 1 apresenta os tipos de malha existentes e as respectivas características.

Tabela C 1 – Características das malhas usadas na análise *Moldflow*

Malha	Análise	Características	Elemento		
			Viga	Triângulo	Tetraedro
<i>Midplane</i>	<i>Midplane</i>	A malha é definida no <i>midplane</i> ou linha central das secções transversais da peça.	P	P	-
<i>Fusion</i>	<i>Dual Domain</i>	Os elementos triangulares são definidos na superfície das secções transversais das peças.	P	P	-
3D	3D	Usa várias filas de tetraedros para definir as peças.	P	-	P

A Figura C 2 ilustra o modo de definição das malhas.

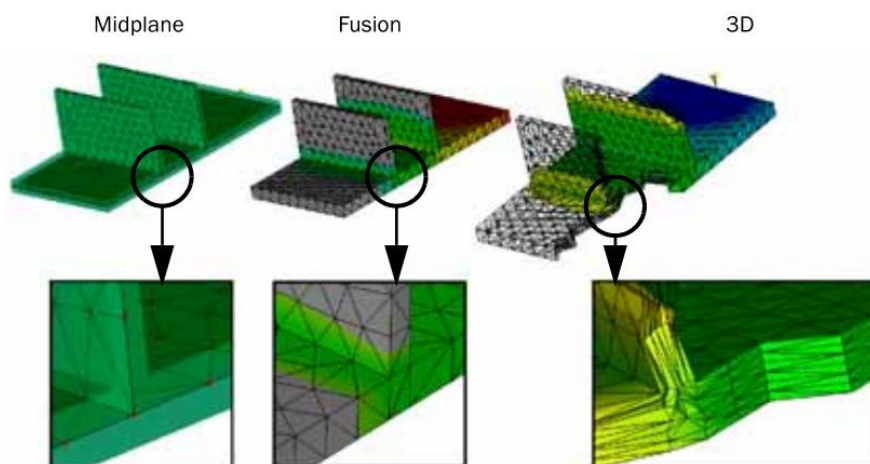


Figura C 2 – Modo de definição das malhas *Moldflow*

Anexo D – Informação do Material

Mold surface temperature	<input type="text" value="100"/>	C
Melt temperature	<input type="text" value="300"/>	C
Mold temperature range (recommended)		
Minimum	<input type="text" value="80"/>	C
Maximum	<input type="text" value="120"/>	C
Melt temperature range (recommended)		
Minimum	<input type="text" value="280"/>	C
Maximum	<input type="text" value="320"/>	C
Absolute maximum melt temperature	<input type="text" value="330"/>	C
Ejection temperature	<input type="text" value="130"/>	C
Maximum shear stress	<input type="text" value="0.5"/>	MPa
Maximum shear rate	<input type="text" value="40000"/>	1/s

Figura D 1 – Propriedades térmicas do conjunto material/molde

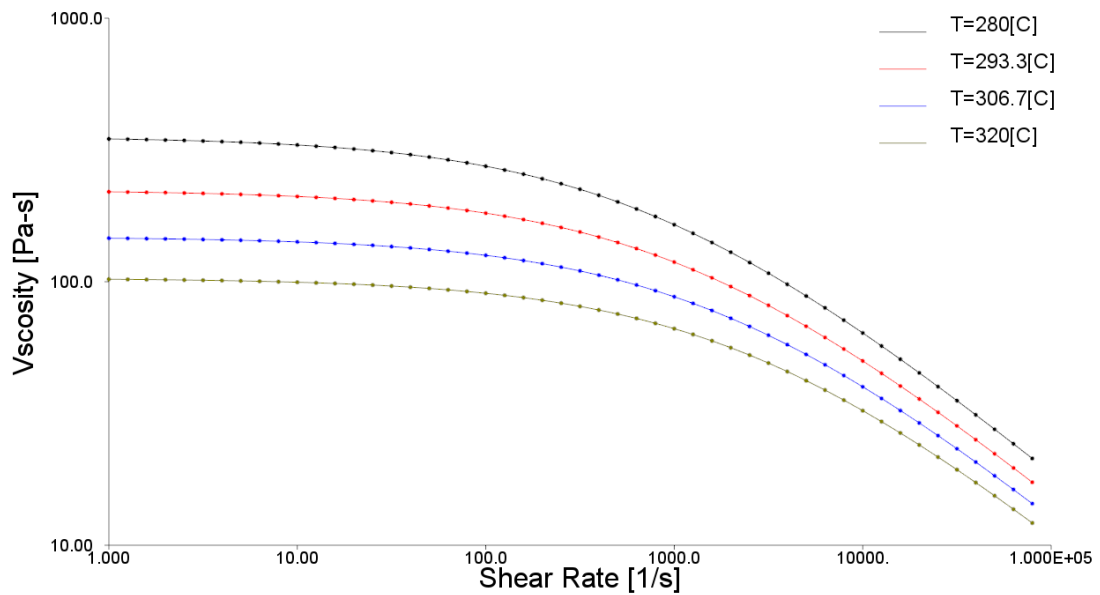


Figura D 2 – Viscosidade do material

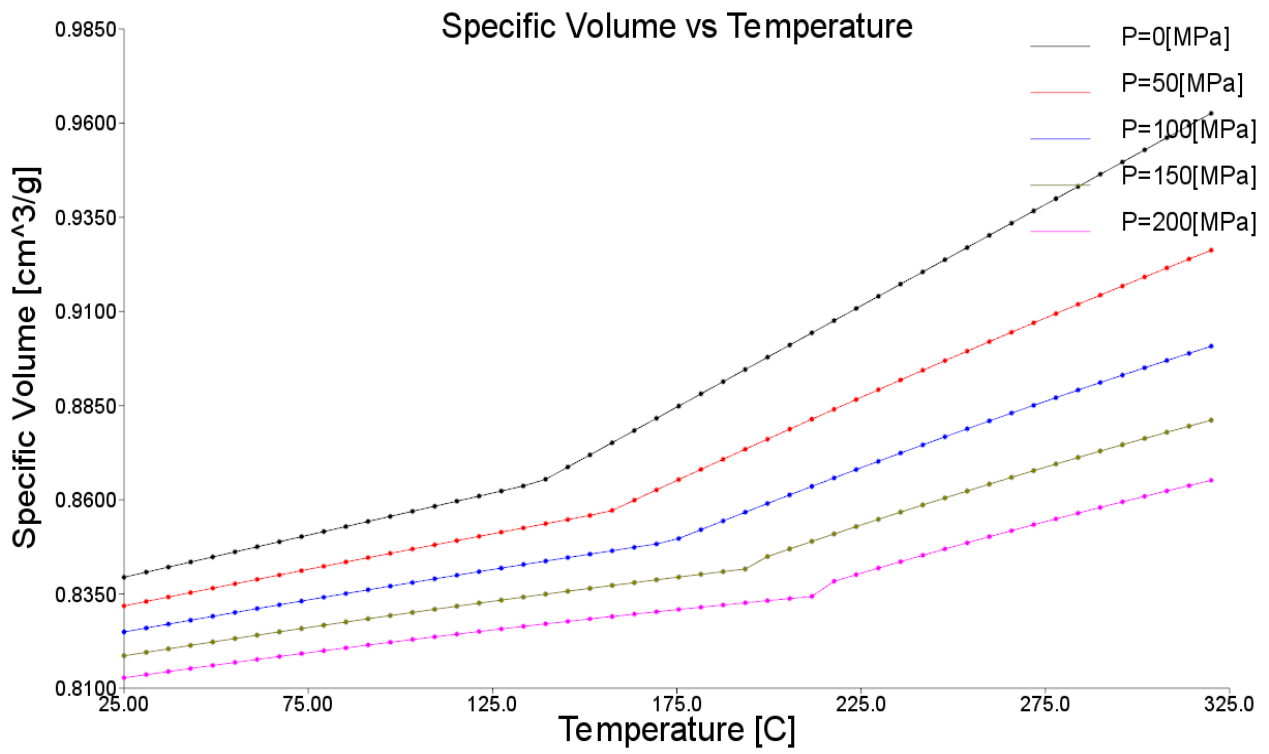


Figura D 3 – Volume específico vs temperatura do material

Anexo E – Edição dos canais de arrefecimento

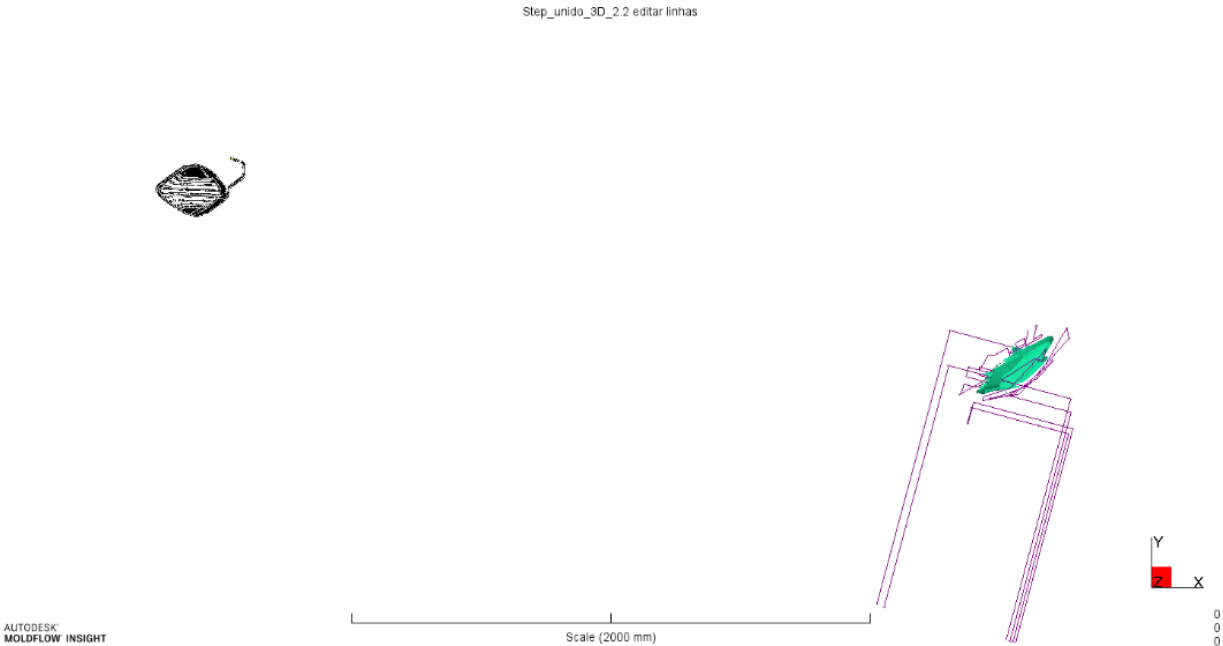


Figura E 1 – Importação do modelo com curvas IGES

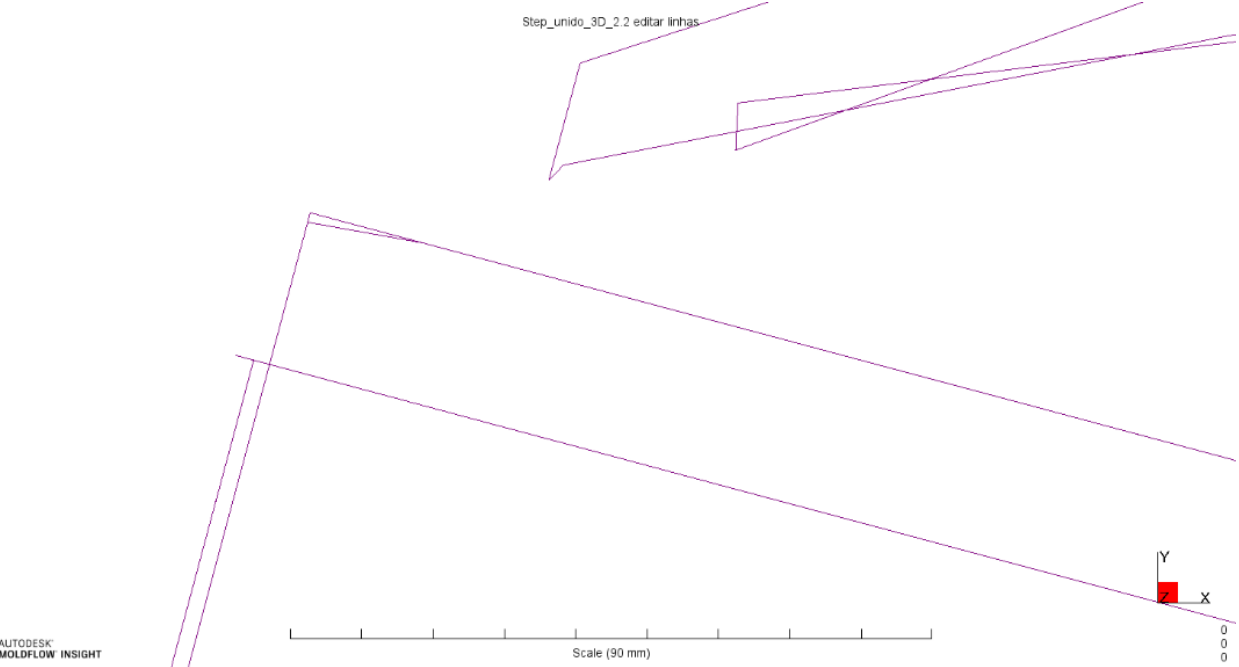


Figura E 2 – Reparação e edição das curvas IGES

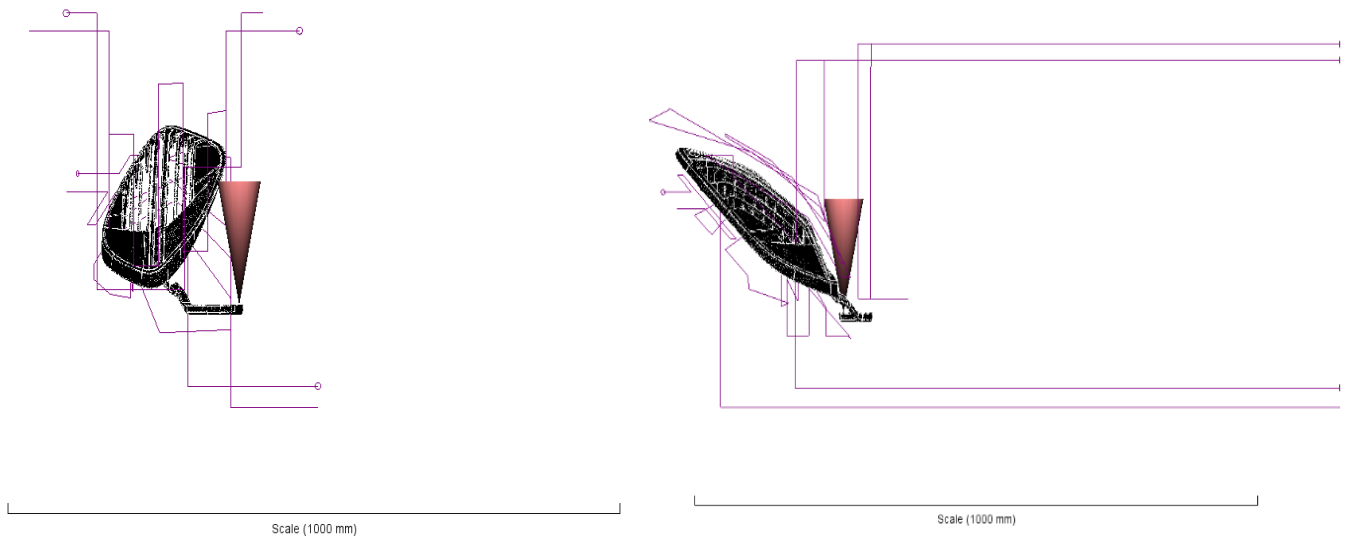


Figura E 3 – Reposicionamento das curvas que representam o sistema de arrefecimento

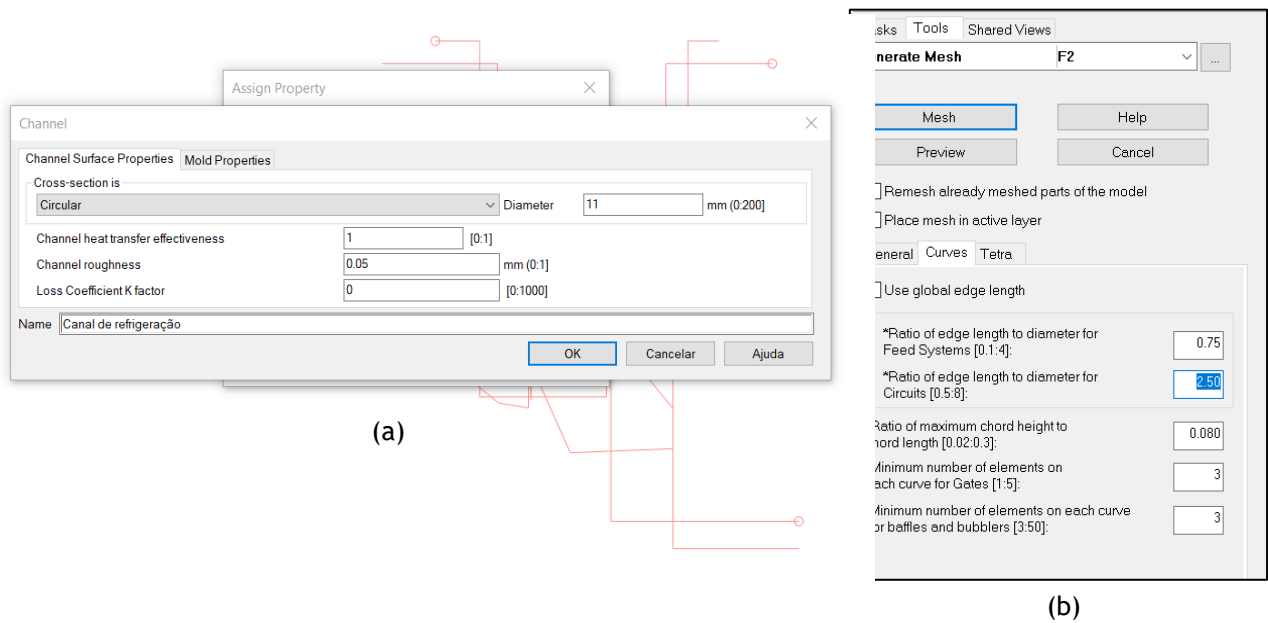


Figura E 4 – (a) dimensionamento dos canais de refrigeração; (b) parametrização do malhamento

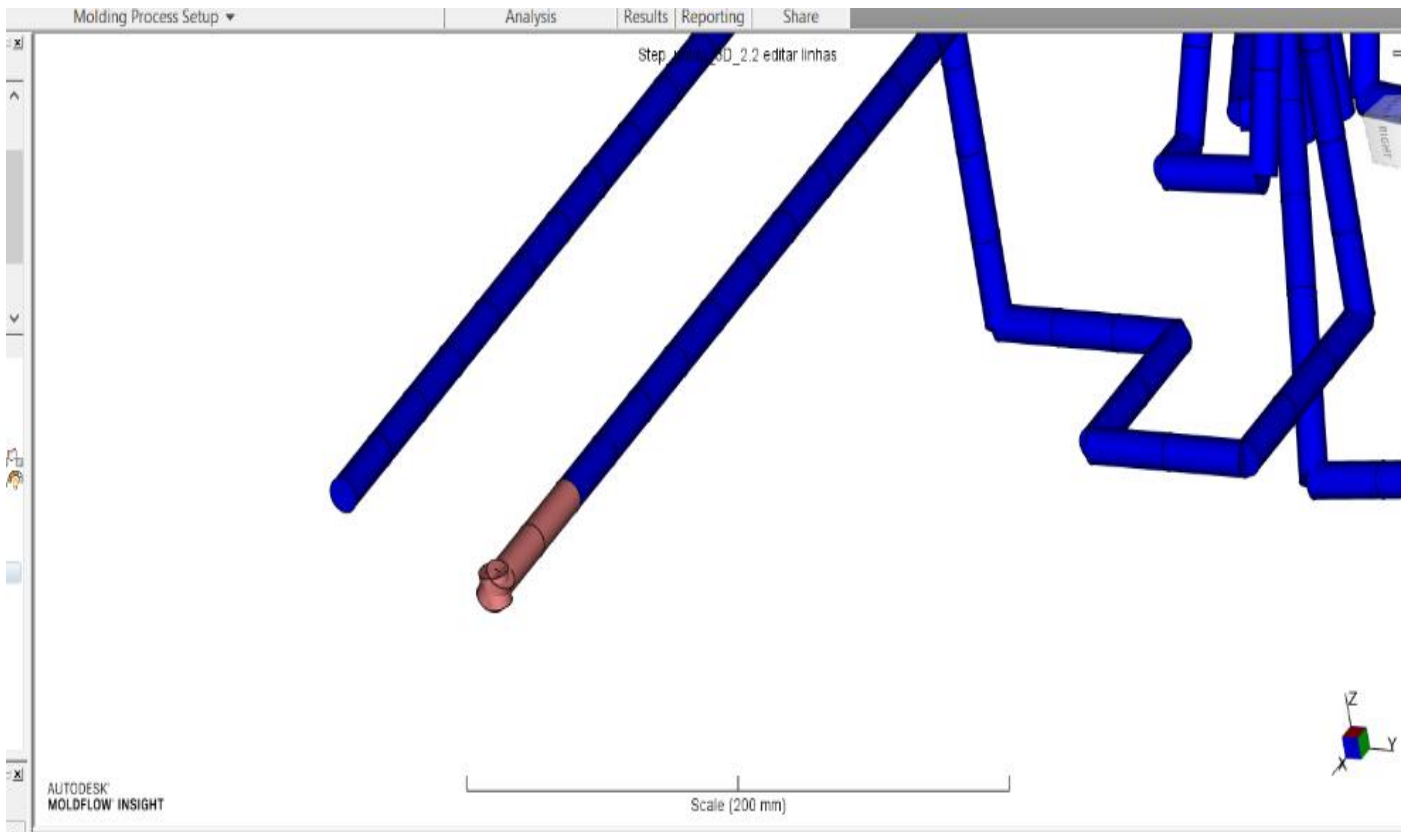


Figura E 5 – Edição da malha

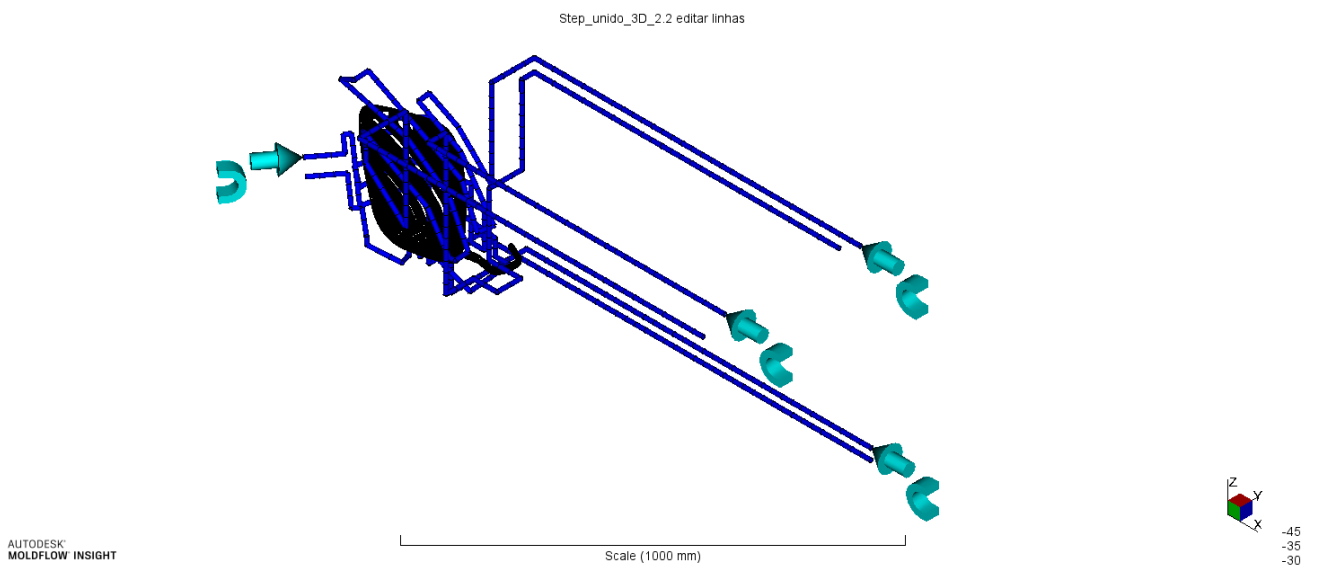


Figura E 6 – Definição dos *inlets* do sistema de refrigeração

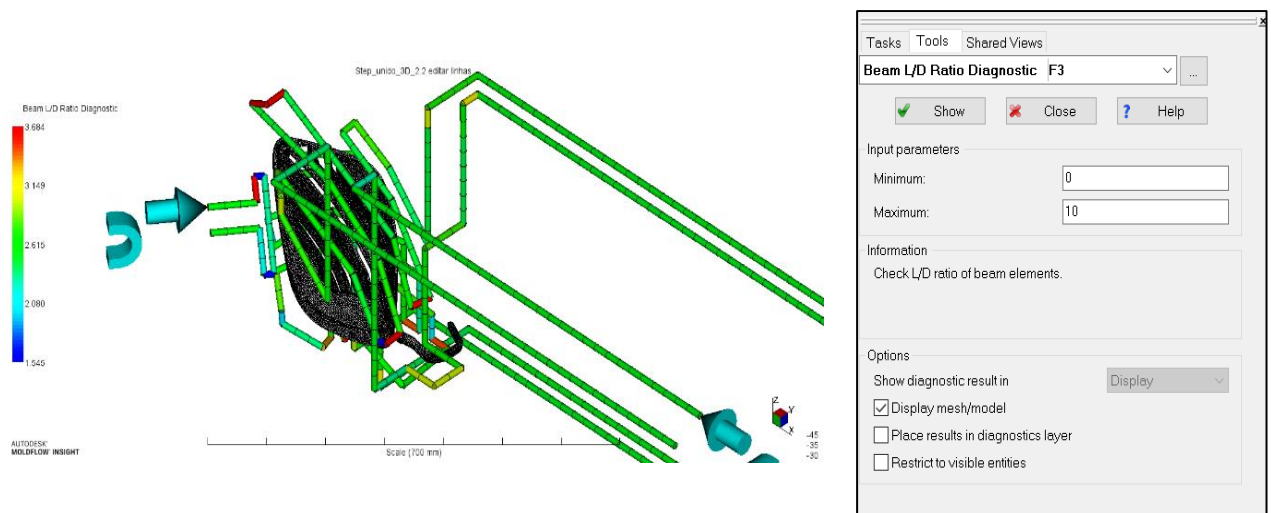


Figura E 7 – Diagnóstico da razão largura/diâmetro das vigas

Anexo F – Parametrização da análise *Cool + Fill&Pack + Warp*

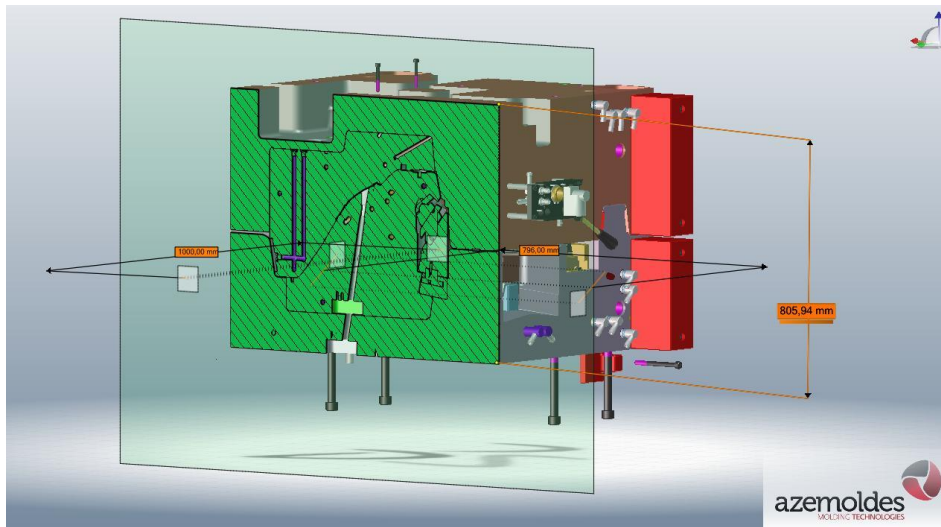


Figura F 1 – Modelo CAD do molde fornecido pela *Azemoldes* para retirar as dimensões a aplicar no *Moldflow*

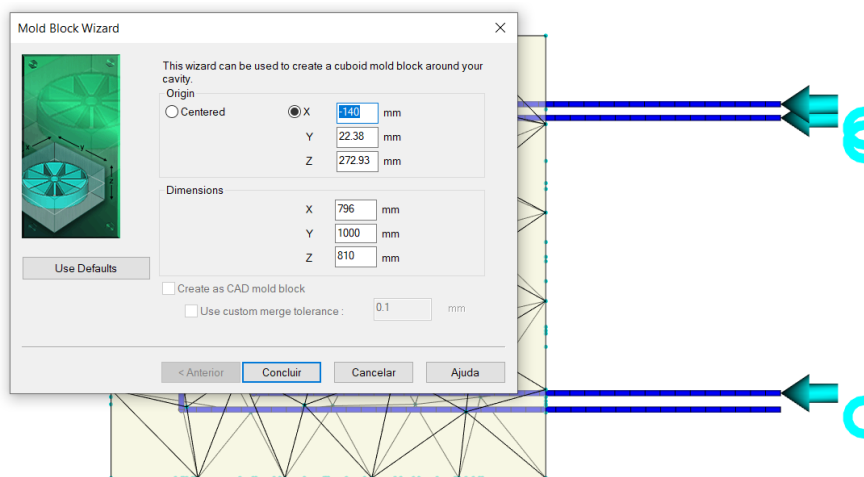


Figura F 2 – Dimensionamento da malha do molde

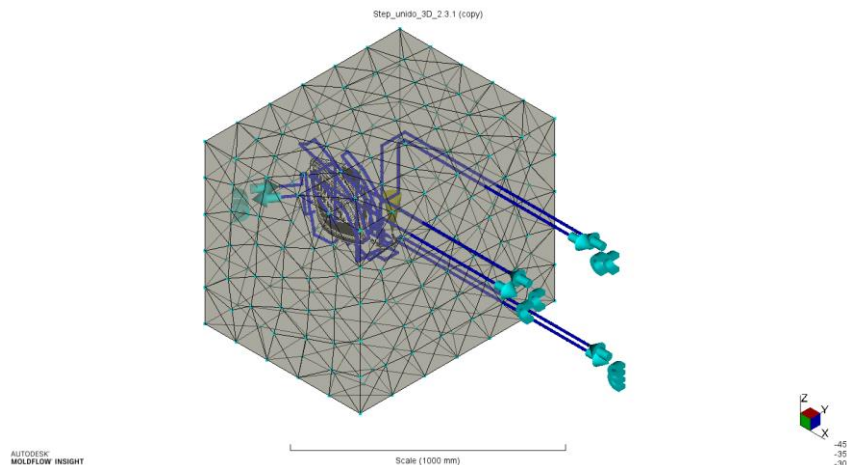


Figura F 3 – Malha do molde concluída

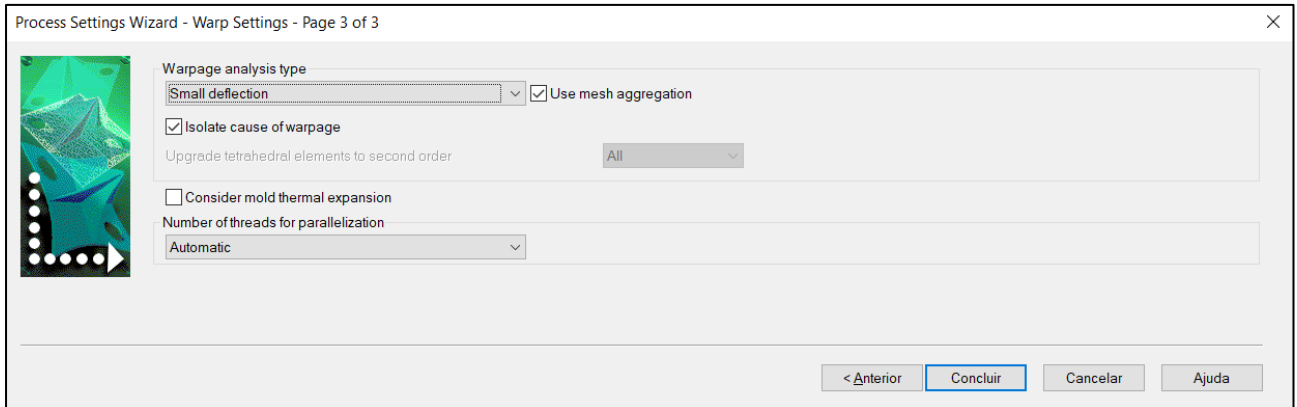
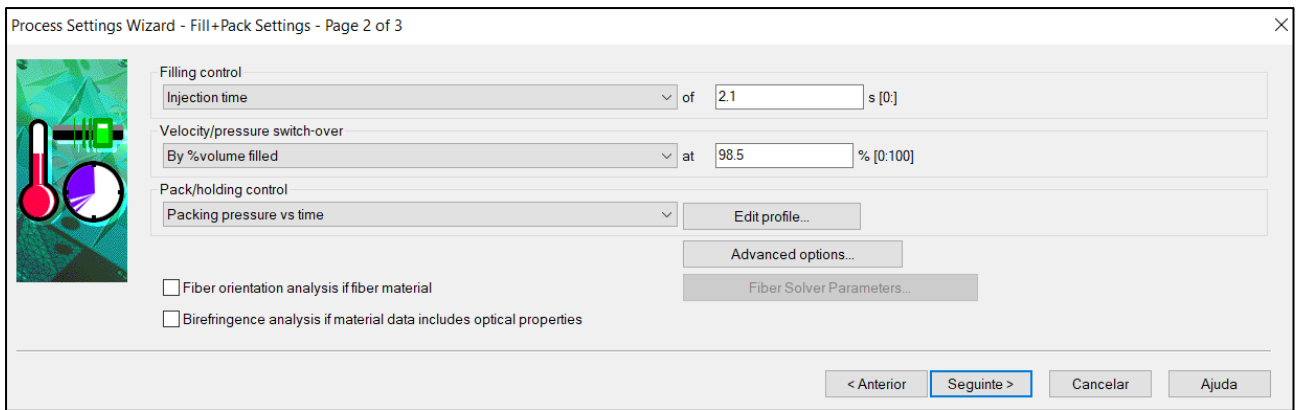


Figura F 4 – Parâmetros da simulação *Cool + Fill&Pack + Warp*

Anexo G – Resultados do estudo do empeno

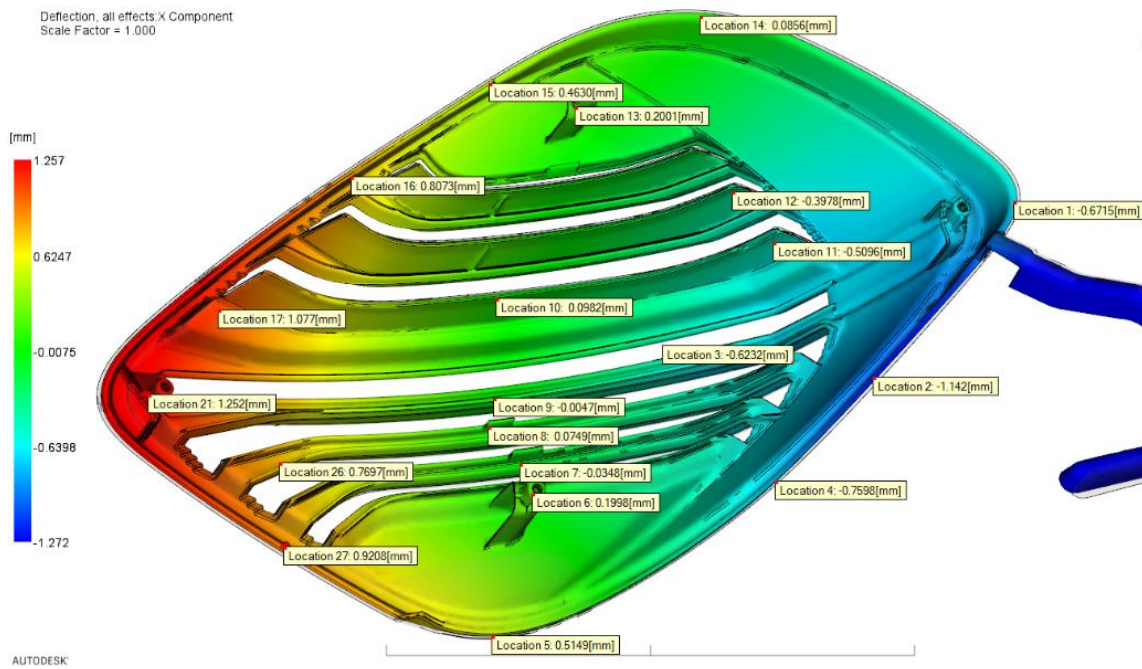


Figura G 1 – Deflexão, todos os efeitos. Componente X

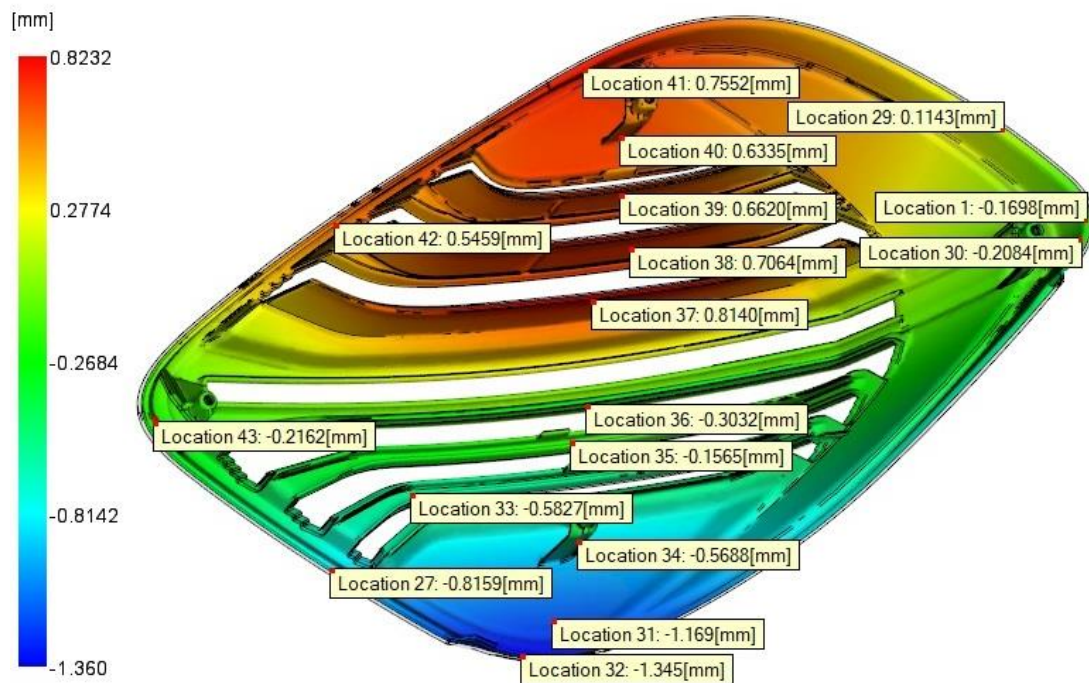


Figura G 2 – Deflexão, todos os efeitos. Componente Y

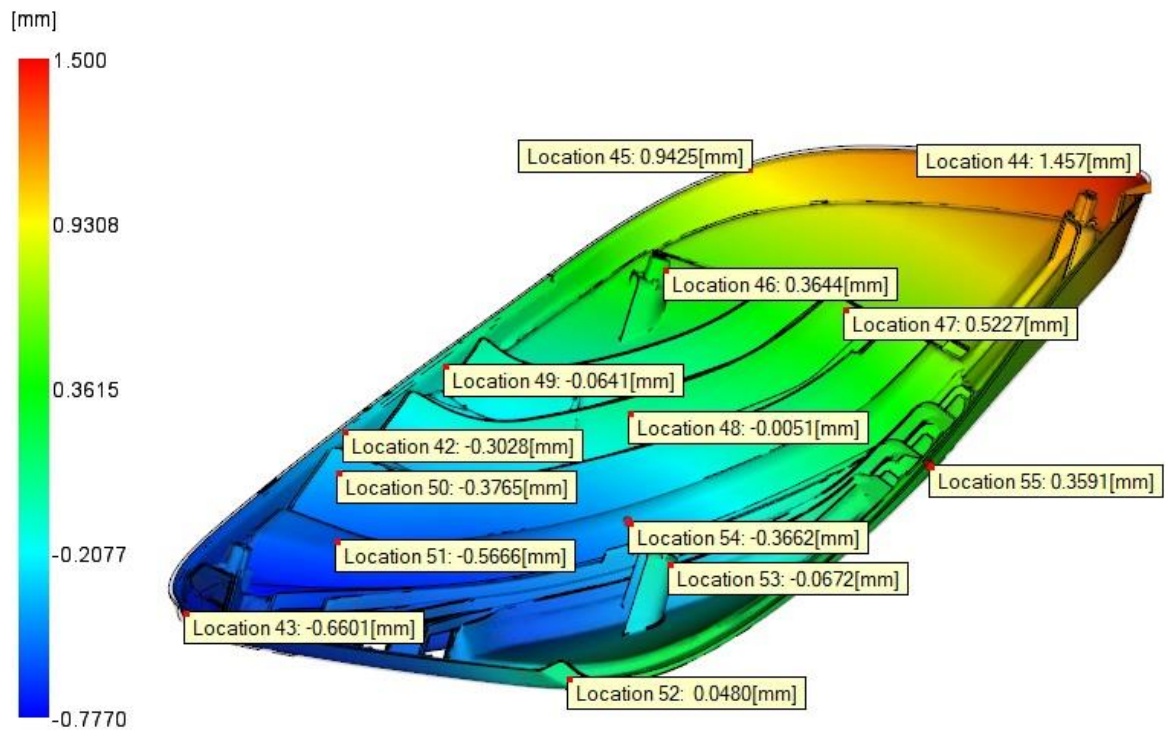


Figura G 3 – Deflexão, todos os efeitos. Componente Z

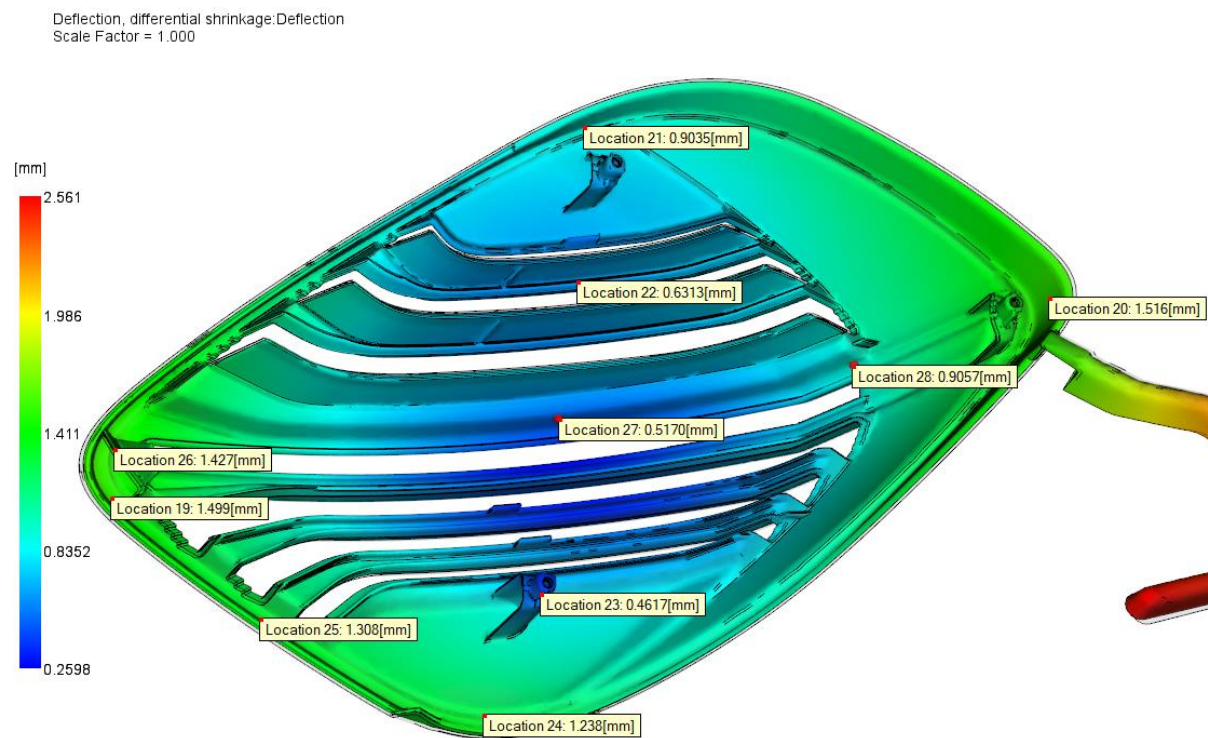


Figura G 4 – Contração diferencial, todos os componentes

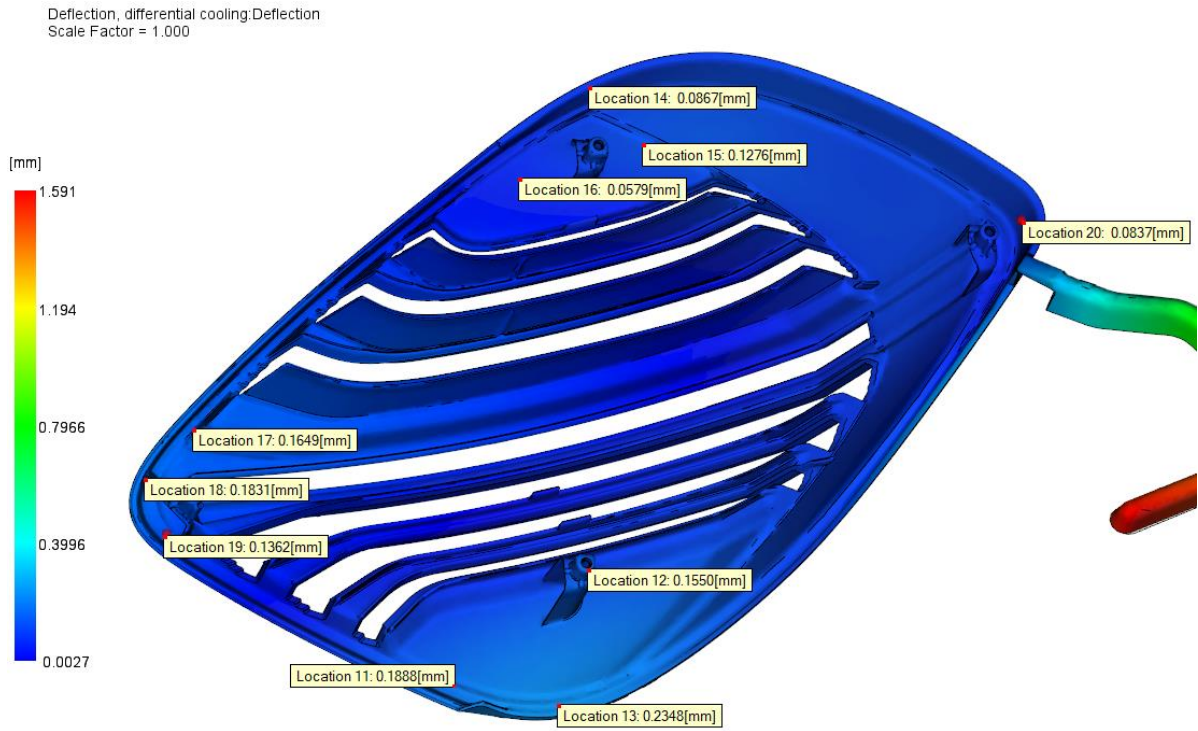


Figura G 5 – Arrefecimento diferencial, todos os componentes

Anexo H – Cálculos do tempo de simulação e análise da peça

Tabela H 1 – Cálculos do tempo de simulação e análise da peça

Ação	Tempo “otimizado”	Tempo de aprendizagem*	Computação	Tempo de computação
Observação e análise de erros do modelo CAD	5 min	30 min	<i>File doctor</i>	2 min
Criação de projeto e importação	5 min	10 dias (15 min)	Importação	1 min
Preparação do malhamento + <i>clean up</i>	2 + 3 horas	20 dias	Malhamento 3D	6 min
Importação e preparação do malhamento refrigeração + <i>clean up</i>	2 + 1 horas	7 dias	Malhamento vigas	3 min
<i>Input</i> dos parâmetros do processo e perfil de compressão (preparação da simulação)	2 horas	7 dias	<i>Cool + Fill&Pack + Warp</i>	4h + 1h 42m + 27 m
Interpretação dos resultados	4 horas	7 dias	-	-
Elaboração do relatório	6 horas	3 dias	-	-
TOTAL	20 horas	1 mês e 3 semanas	-	6 h 21 m

*Tempo para investigar os diversos problemas encontrados e das sucessivas tentativas e estudos para otimização da malha, da refrigeração, parâmetros, simulações, etc. Abaixo (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), pode observar-se o número de estudos feitos para otimizar o estudo final.

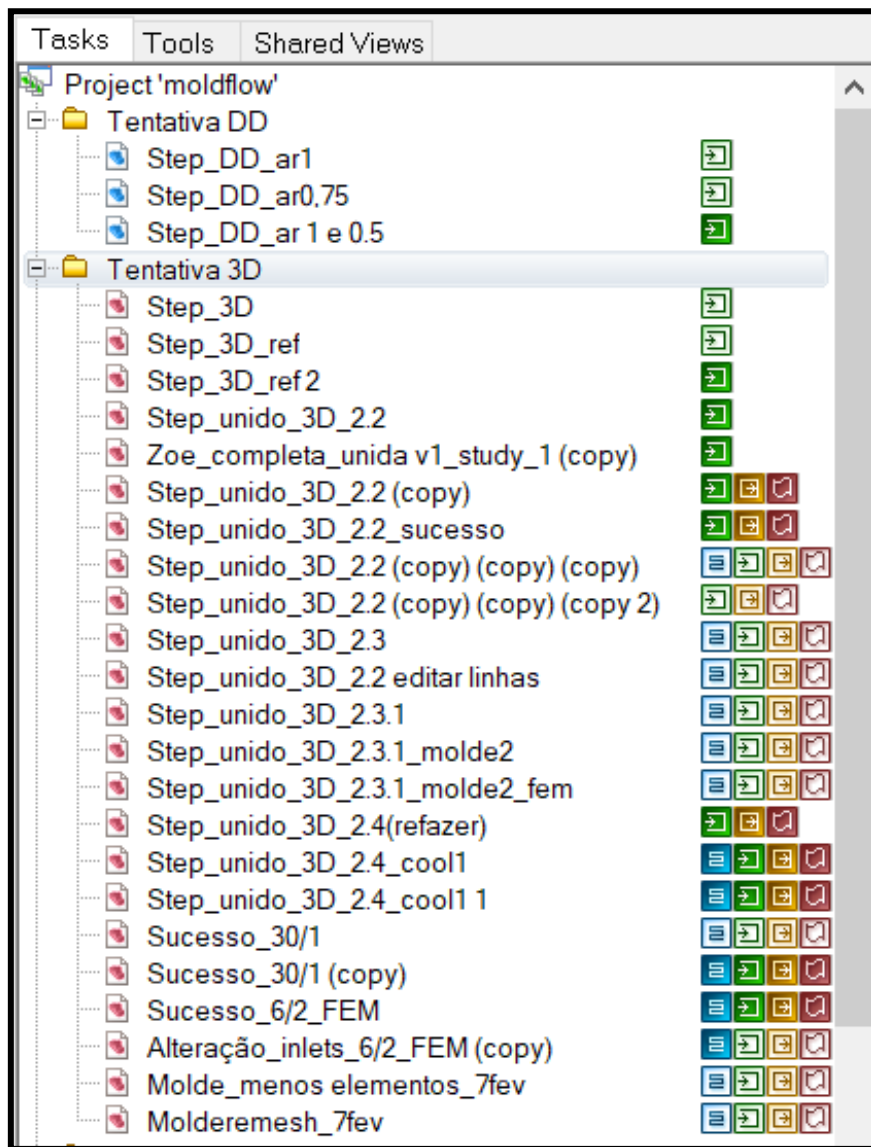


Figura H 1 – Estudos feitos para otimizar o estudo final