



2017

OTIMIZAÇÃO DA CADEIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE MOLDES COM SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO POR MOLDFLOW

FRANCISCO ALÇADA FERNANDINHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Orientador na PRINEMO: Eng. ° Filipe Pires

Orientador na FEUP: Professor Vítor Martins Augusto

CANDIDATO	Francisco Alçada Fernandinho		Código
TÍTULO	Otimização da cadeia de desenvolvimento do projeto de moldes com simulação de injeção por Moldflow		
DATA	17 de Julho de 2017		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 15:15h		
JÚRI	Presidente	Laura Ribeiro	DEMM/FEUP
	Arguente	Carlos Alberto Moura Relvas	DEM/UA
	Orientador	Vitor Martins Augusto	DEMM/FEUP

RESUMO

Os construtores de moldes confrontam-se com a necessidade de equilibrar dois tipos de fatores competitivos que apontam em sentidos opostos, de forma a assegurar a sustentabilidade do seu negócio. Por um lado, a concorrência pressiona as empresas a melhorar do seu desempenho ao nível do preço/custo e prazo de entrega. Por outro lado, existe a necessidade de reforçar a qualidade dos moldes de forma a manter satisfação do cliente.

O objetivo desta dissertação é determinar a rentabilidade de incorporar a simulação de injeção na fase inicial do desenvolvimento do projeto, com a finalidade de obter peças plásticas de alta qualidade e ao mesmo tempo reduzir o número de ensaios necessários para a aprovação de moldes de injeção, o que se traduz em moldes funcionais em menos tempo.

ABSTRACT

In order to ensure the sustainability of their business, injection mold manufacturers face the need to balance two competitive factors pointing in opposite directions. On one hand, competition pushes companies to improve their performance in terms of price/cost and delivery time. On the other hand, there is the need to improve the quality of moulds in order to maintain customer satisfaction.

The objective of this dissertation is to determine the profitability of incorporating injection simulation in the initial phase of the development of the project, in order to obtain top quality plastic parts and at the same time reducing the number of trials needed for approval of injection moulds, which translates in functional molds in less time.

AGRADECIMENTOS

Concluído o projeto, não poderia deixar de prestar o meu agradecimento a todas as pessoas que me acompanharam ao longo deste período.

Deixo algumas palavras, certamente poucas, mas com um profundo sentimento de gratidão a todas as pessoas que a me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos.

Ao Eng.º Nelson Machado por me conceder a oportunidade em realizar a dissertação em ambiente empresarial na PRINEMO.

Um obrigado a todos os colaboradores da PRINEMO, particularmente ao Eng.º Filipe Pires, meu orientador na empresa, por todo o aconselhamento, por todo o apoio prestado e pela disponibilidade total com que me recebeu desde o primeiro dia. A ele, um enorme obrigado.

Ao meu orientador na Universidade, Eng.º Vitor Martins Augusto pela disponibilidade, pela motivação, pela experiência transmitida e pelas palavras concisas e absolutamente essenciais à elaboração desta dissertação, bem como todo o corpo docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Ao Sr. Alexandre Prior pela disponibilidade e colaboração, bem como a todos os colaboradores da PRIFER que me permitiram adquirir os dados e informações sem as quais este trabalho não teria sido possível.

A todos os meus amigos por todos os bons momentos, pela sua amizade e apoio incondicional.

Finalmente agradeço a toda a minha família que são uma presença constante na minha vida, sobretudo aos meus pais. É a eles que devo tudo.

Muito obrigado

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMENTOS	III
1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO	- 1 -
1.1 MOTIVAÇÃO	- 1 -
1.2 APRESENTAÇÃO DO GRUPO PRIFER	- 2 -
1.2.1 PRINEMO	- 2 -
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	- 3 -
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	- 3 -
2. INTRODUÇÃO TEÓRICA	- 4 -
2.1 INDÚSTRIA PORTUGUESA DE MOLDES	- 4 -
2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO DE PLÁSTICOS	- 5 -
2.2.1 Materiais poliméricos	- 6 -
2.2.2 Máquina de Injeção	- 7 -
2.2.3 Ciclo de Injeção	- 10 -
2.2.4 Princípio de funcionamento de um molde de injeção	- 11 -
2.3 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES NA INDÚSTRIA DE MOLDES	- 15 -
2.4 SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO	- 16 -
3. ESTADO ATUAL DA PRIFER	- 17 -
3.1 CADEIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM MOLDE NA PRIFER	- 17 -
3.2 ENSAIO DE MOLDE NA PRIFER	- 19 -
3.3 UTILIZAÇÃO DE MOLDFLOW NA PRIFER	- 22 -
4. MOLDFLOW	- 23 -
4.1 FUNCIONALIDADES DO SOFTWARE	- 23 -
4.1.1 Simulação de Enchimento e Compactação	- 24 -
4.1.2 Simulação de Arrefecimento	- 25 -
4.1.3 Simulação de empenos	- 28 -
5. TRABALHO DESENVOLVIDO	- 29 -
5.1 CASO DE ESTUDO	- 29 -
5.1.1 Estudo de enchimento	- 29 -
5.1.2 Estudo de Arrefecimento e Empeno	- 32 -
5.2 ANÁLISE DE MOLDES COM PROBLEMAS DE INJEÇÃO	- 40 -
5.2.1 Molde 1	- 40 -
5.2.2 Molde 2	- 45 -
5.3 VIABILIDADE ECONÓMICA	- 50 -
5.3.2 Constatações	- 53 -
6. CONCLUSÕES FINAIS	- 57 -
7. PROPOSTA E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	- 60 -
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 61 -
9. ANEXOS	- 62 -

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - INSTALAÇÕES DA PRIFER EM ALBERGARIA-A-VELHA E EMPRESAS DO GRUPO PRIFER [1]	- 2 -
FIGURA 2 - BALANÇO COMERCIAL PRODUÇÃO VS EXPORTAÇÃO DA INDÚSTRIA DE MOLDES EM MILHÕES DE EUROS [2].	- 4 -
FIGURA 3 - INFORMAÇÃO ESTATÍSTICA SOBRE OS PRINCIPAIS CLIENTES DA INDÚSTRIA DE MOLDES NO ANO DE 2014 [2]	- 5 -
FIGURA 4 - ORGANIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CADEIAS MOLECULARES DOS DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS	- 6 -
FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO COMERCIAL DE TERMOPLÁSTICOS [8]	- 7 -
FIGURA 6 - ESQUEMA DE MÁQUINA DE INJEÇÃO [9]	- 8 -
FIGURA 7 - VISTA EM CORTE DE UM CILINDRO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS [7]	- 8 -
FIGURA 8 - CICLO DE INJEÇÃO. A) FECHO DE MOLDE ; B) ENCHIMENTO; C) COMPACTAÇÃO; D) ABERTURA DO MOLDE E EXTRAÇÃO [4]	- 10 -
FIGURA 9 - PERFIL DE PRESSÕES DURANTE A INJEÇÃO	- 11 -
FIGURA 10- DUAS CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE MATERIAL [11]	- 13 -
FIGURA 11 - VISTA ISOMÉTRICA DE UM MOLDE SIMPLES DE DUAS PLACAS DURANTE A FASE DE EXTRAÇÃO [11]	- 13 -
FIGURA 12- VISTA SECCIONADA DE UM MOLDE DE TRÊS PLACAS DURANTE A FASE DE EXTRAÇÃO [11]	- 14 -
FIGURA 13 - VISTA SECCIONADA DE MOLDE DE CANAIS QUENTES (ESQUERDA) E DETALHE DA PLACA DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO (DIREITA) A- INJETOR PRINCIPAL B - DISTRIBUIDOR C -BICOS QUENTES [11]	- 15 -
- 18 -	
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS NA PRIFER	- 18 -
FIGURA 15 - INSPEÇÃO VISUAL DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO	- 19 -
FIGURA 16 - EVOLUÇÃO TÍPICA DE UM PERFIL DE COMPACTAÇÃO [14]	- 20 -
FIGURA 17 - INTERFACE DO SOFTWARE	- 23 -
FIGURA 18 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA PALHETA	- 26 -
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DE UM ESCOAMENTO LAMINAR (ESQUERDA) E TURBULENTO (DIREITA)	- 27 -
FIGURA 20 - PEÇA ESTUDADA E RESPECTIVAS DIMENSÕES	- 29 -
FIGURA 21 - TEMPERATURA DA FRENTE DE FLUXO (ACIMA) E CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA (EM BAIXO)	- 31 -
FIGURA 22 - TAXA DE CORTE EM CADA PONTO DE INJEÇÃO	- 31 -
FIGURA 23 - ASPETO DAS CURVAS GUIA DEPOIS DE IMPORTADAS PARA O MOLDFLOW, ANTES DA CORREÇÃO E DA DESIGNAÇÃO DE PROPRIEDADES	- 32 -
FIGURA 24 - SISTEMA DE ARREFECIMENTO UTILIZADO APÓS GERAR A MALHA	- 33 -
FIGURA 25 – TEMPERATURA DO LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO	- 34 -
FIGURA 26 - TEMPERATURA DA PEÇA NO LADO DO MACHO E NA CAVIDADE E ZONA DE CONCENTRAÇÃO DE CALOR	- 36 -
FIGURA 27 - TEMPO ATÉ À TEMPERATURA DE EXTRAÇÃO	- 36 -
FIGURA 26 - FRAÇÃO DA CAMADA SOLIDIFICADA AO 11 E AOS 23 SEGUNDOS	- 37 -
FIGURA 27 - EMPENO NAS DIREÇÕES X, Y E Z E EMPENO TOTAL COM TODAS AS CAUSAS DE EMPENO	- 38 -
FIGURA 28 - EMPENO TOTAL POR DIFERENCIAIS DE CONTRAÇÃO	- 39 -

FIGURA 29 - - MODELO 3D DO MOLDE E ESQUEMA DO SISTEMA DE INJEÇÃO UTILIZADO	- 40 -
FIGURA 30 -FORÇA DE FECHO ESTIMADA NO ESTUDO DO CLIENTE E NO ENSAIO INTERNO DA PRIFER	- 41 -
FIGURA 31 - TAXA DE CORTE NOS VÁRIOS PONTOS DE INJEÇÃO ANTES DE ALTERAÇÕES	- 42 -
FIGURA 32 - RESULTADOS DA TEMPERATURA DE VOLUME AO LONGO DO ENCHIMENTO ANTES DE ALTERAÇÕES	- 42 -
FIGURA 33 - PRESSÃO EM DIVERSOS PONTOS DA CAVIDADE DO MOLDE ANTES DE ALTERAÇÕES	- 43 -
FIGURA 34 - FORÇA DE FECHO E ATAQUE EM LÂMINA APÓS MODIFICAÇÃO	- 44 -
FIGURA 35 - TAXA DE CORTE NOS PONTOS DE INJEÇÃO APÓS AS MODIFICAÇÕES NOS ATAQUES	- 44 -
FIGURA 36 - DIMENSÕES DA PEÇA E ESTRATÉGIA DE INJEÇÃO	- 45 -
FIGURA 37 - VETORES VELOCIDADE DE FLUXO DURANTE O ENCHIMENTO NO INSTANTE 1s	- 46 -
FIGURA 38 - A) PRESSÃO NA CAVIDADE MOLDANTE AOS 0.7s ; B) PRESSÃO NA CAVIDADE AOS 26s; C) VISTA EM CORTE DA ZONA DA GRELHA MAIOR E RESPECTIVO EMPENO	- 47 -
FIGURA 39 - FOTOGRAFIA DA PEÇA ANTES DE SEREM EFETUADAS ALTERAÇÕES AO MOLDE	- 47 -
FIGURA 40 - VOLUME DA PEÇA VS VOLUME DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	- 48 -
FIGURA 41 - ESQUEMA DAS ALTERAÇÕES NO MOLDE REALIZADAS PARA FACILITAR O FLUXO E FOTOGRAFIA DA PEÇA APÓS ABERTURA DOS CAMINHOS DE FLUXO	- 48 -

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - REGIMES DE ESCOAMENTO
TABELA 2 - PARÂMETROS DE INJEÇÃO
TABELA 3 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE ARREFECIMENTO
TABELA 4 - CUSTOS DE ESTUDOS DE MOLDFLOW
TABELA 5 - CUSTOS DE ENSAIOS DE MOLDE
TABELA 6 - DADOS SOBRE MOLDES DA PRIFER NO ANO DE 2016
TABELA 7 - MOLDES IDENTIFICADOS COM PROBLEMAS DE INJEÇÃO

1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

1.1 MOTIVAÇÃO

Hoje em dia, Portugal ocupa um lugar de destaque a nível mundial na indústria de moldes para plásticos e cada vez mais, as grandes multinacionais escolhem as empresas portuguesas para o fabrico dos seus moldes quer ao nível de produtos relacionados com a indústria automóvel, aeronáutica, quer ao nível da eletrónica quer de embalagens de todo o tipo.

No âmbito da Unidade Curricular “Dissertação” do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (MIEMM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foi realizado um trabalho na empresa PRINEMO, pertencente ao grupo PRIFER. O trabalho foi denominado de “Otimização da cadeia de desenvolvimento do projeto de moldes com simulação de injeção por Moldflow”. Este projeto tem como principal objetivo tentar melhorar o método pelo qual são realizados os ensaios de molde até à sua aprovação. Atualmente este processo baseia-se num método iterativo de tentativa e erro que pode ser otimizado.

Nesse sentido, irá ser estudada a viabilidade da implementação do Software Moldflow Insight durante o projeto de molde e com isso tentar-se-á reduzir o tempo ou número necessário de ensaios para a aprovação do mesmo.

1.2 APRESENTAÇÃO DO GRUPO PRIFER

A Prifer iniciou a sua atividade em 1996, com apenas 12 colaboradores, como uma empresa de moldes de consumo interno com o objetivo de fabricar moldes e ferramentas para responder às necessidades de algumas empresas do grupo. Ao longo dos últimos 20 anos a PRIFER, sediada Albergaria-a-Velha, foi ganhando clientes e aumentando a sua capacidade produtiva, sendo que hoje é um fabricante exclusivo de moldes de injeção de plásticos, alumínio e ligas zamak (zinco, alumínio, magnésio e cobre) de até 30T. Com 125 trabalhadores, produz cerca de 100 moldes por ano. O seu crescimento transformou-a num grupo que se expandiu para outras áreas subsidiárias, e hoje, o grupo PRIFER possui associadas oito empresas que operam nas mais diversas áreas [1].

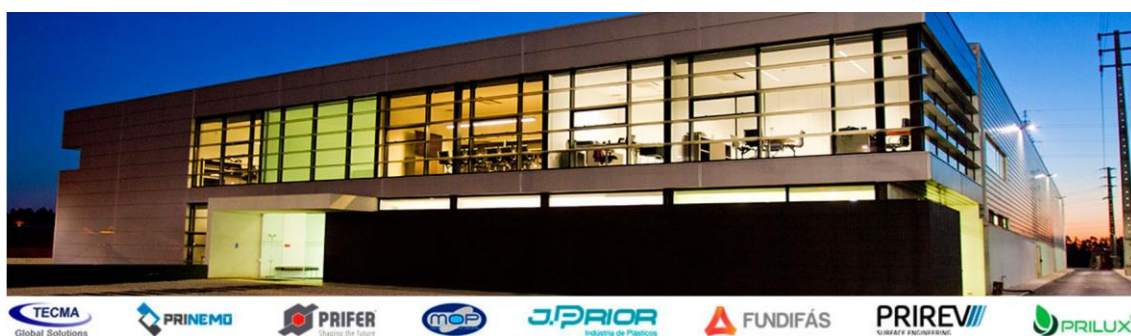


Figura 1 - Instalações da PRIFER em Albergaria-a-Velha e empresas do grupo PRIFER [1]

TECMA (Gestão global de projetos de moldes - Le Mans - França)

PRINEMO (Desenvolvimento de produto – Cacia, Aveiro)

MOP (Fabrico de moldes de injeção de plástico até 5T - Leiria)

J. Prior (Injeção de plástico, extrusão e montagem - Vagos, Aveiro)

FUNDIFÁS (Fundição Injetada de alumínio e Zamak, acabamentos de superfície - Águeda, Aveiro)

PRIREV (revestimentos técnicos e tratamentos de metais - Vagos, Aveiro)

PRILUX (Sistemas de irrigação industrial e estufas - Vagos, Aveiro)

1.2.1 PRINEMO

A PRINEMO é uma empresa fundada em 2015 que tem como principal serviço o desenvolvimento de produto, assegurando o desenvolvimento de componentes otimizados para a sua função específica, mas também para o projeto do molde, tornando a produção viável tanto a nível de qualidade como para produção em série. Oferece serviços de engenharia especializada, com foco em peças de interior automóvel e componentes de plástico.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

- Realizar uma análise estatística sobre a incorporação de estudos de simulação de injeção (MoldFlow) na fase inicial de projeto de molde.
- Estudar a viabilidade da realização de estudos Moldflow internos PRIFER para efeitos de comparação/confirmação com estudos de clientes.
- Aferir se a realização desta análise poderá evitar moldes mal concebidos e poupar custos associados a reparações relacionadas com a problemas de injeção.
- Analisar se este estudo permite reduzir o custo inerente ao ensaio de molde, através da diminuição do numero de ensaios ou do tempo de ensaios.
- Promover a rentabilização de recursos da PRIFER

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 foi feita um enquadramento teórico sobre o estado atual da indústria de injeção de plásticos. Elaborou-se uma breve introdução ao setor dos moldes em Portugal, ao processo de injeção e a todas as suas envolventes. Deste modo, para concluir o capítulo é feita uma contextualização da aplicação de softwares na indústria de moldes e da aplicação da simulação de injeção.

No capítulo 3 é descrito o processo produtivo na PRIFER e os métodos de ensaio na empresa. Por fim é explicada a utilização do Moldflow na empresa.

O capítulo 4 destina-se à exposição do programa e das suas funcionalidades. É feita uma breve explicação dos resultados fornecidos por cada análise bem como a descrição de como cada resultado deve ser interpretado.

No capítulo 5 são apresentadas todas as potencialidades do programa. Inicialmente é feito um estudo de otimização da injeção de uma peça plástica e depois, numa segunda fase, é utilizado o Moldflow como ferramenta de diagnóstico para dois moldes problemáticos da PRIFER. Finalmente é realizada uma análise financeira no sentido de confrontar os custos de um estudo de Moldflow e o custo de ensaios de molde.

O capítulo 6 trata das conclusões desta dissertação.

No capítulo 7 são apresentadas algumas sugestões para proposta de melhoria e perspetivas de trabalho futuro.

2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA PORTUGUESA DE MOLDES

As origens históricas da indústria portuguesa de moldes para plásticos, para além da sua ligação óbvia com a indústria de plásticos, estão também intimamente ligadas a um outro setor industrial - o do vidro. A produção a nível nacional dos primeiros moldes realizou-se para a indústria do vidro no início do séc. XX, tendo posteriormente evoluído para moldes de baquelite e finalmente para a injeção de plásticos, já na década de 40, na Marinha Grande.

O setor dos moldes em Portugal é um dos pilares da indústria metalomecânica em Portugal e concentra-se de uma forma mais intensa nas regiões da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis. Constituído por cerca de 450 empresas, este setor é extremamente reconhecido fora do país, sendo que Portugal é um dos principais fabricantes de moldes do mundo (8º a nível global, 3º a nível europeu) exportando atualmente 85% da produção total [2], [3].

Pela análise da figura 2 podemos constatar que existe uma forte vocação exportadora neste setor (a exportação nunca é inferior a 75% da produção) e que existe uma tendência de crescimento.

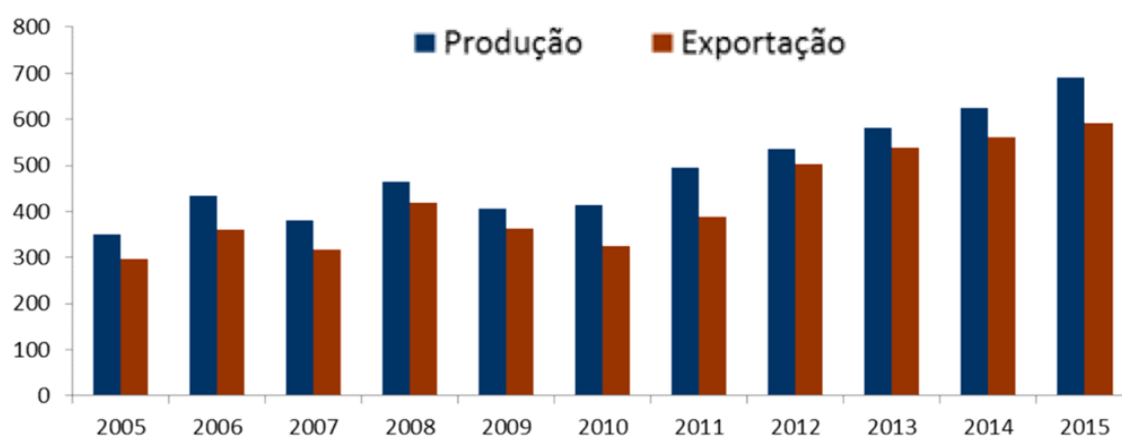


Figura 2 - Balanço comercial Produção vs Exportação da indústria de moldes em milhões de euros [2].

O valor total das exportações portuguesas atingiu, em 2015, os 591 milhões de euros, sendo que as vendas foram efetuadas para 89 mercados (países) distintos, o que demonstra a dimensão internacional e global desta Indústria. Em termos de importância das regiões económicas, mantém-se a

preponderância do mercado europeu, representando nos últimos anos, em média, 79% do total de exportações.

Relativamente aos mercados, podemos ver pela Figura 3 que o setor dos moldes em Portugal, embora sirva vários ramos e indústrias, depende fortemente do setor automóvel contando com 74% do volume de negócio da indústria.

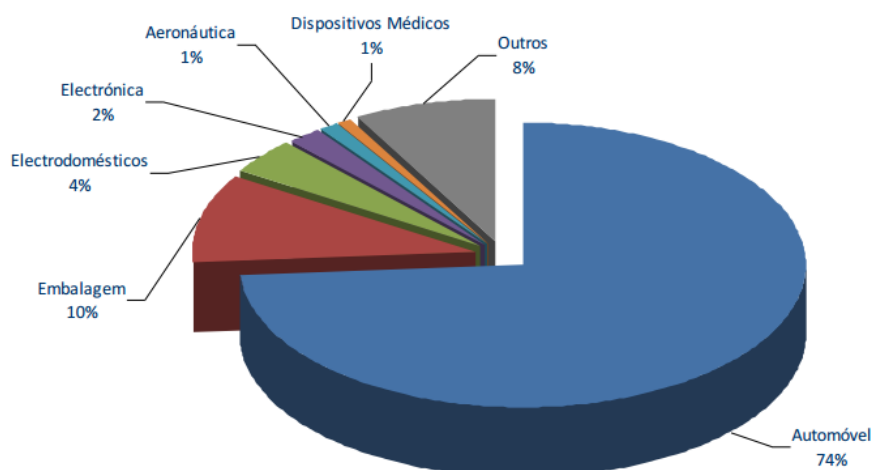


Figura 3 - Informação estatística sobre os principais clientes da indústria de moldes no ano de 2014 [2]

2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

O processo de injeção de plástico é atualmente um dos principais métodos de transformação de materiais de base polimérica. Este método de transformação é muito rápido e de fácil automação pelo que permite obter elevadas cadências de produção a custos relativamente baixos. Para além disso, destaca-se a sua capacidade de produzir peças de geometria complexa com todo o tipo de dimensões e bom acabamento de superfície, garantindo uma grande reprodutibilidade e precisão dimensional [4, 5].

O processo assenta em dois equipamentos essenciais: a máquina de injeção e o molde. A moldação é feita através da pressurização de material quente para dentro do molde onde a geometria pretendida é alcançada pelo arrefecimento do material, no caso dos termoplásticos, ou por reação química nos termoendurecíveis.

2.2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os polímeros são na sua essência pequenas moléculas orgânicas organizadas de uma forma repetitiva em cadeias que formam os monómeros. Ao conjunto de monómeros designa-se de polímero. Estes podem ser classificados em três grupos principais:

Termoendurecíveis - este tipo de polímeros sofre um processo de cura designado de reticulação. Neste processo a sua microestrutura ganha um grau muito elevado de ligações cruzadas que não quebram nem fluem com a adição posterior de calor. Isto faz com que não possam ser reprocessados.

Este tipo de polímeros é utilizado em aplicações onde é requerido um comportamento rígido, resistência, estabilidade térmica e dimensional e durabilidade [6].

Elastómeros - contrariamente aos termoendurecíveis, os elastómeros têm um comportamento elástico, e têm a capacidade de aguentar elevadas deformações. Quando lhes é aplicada uma força é possível deformá-los pois eles retomam a sua forma original automaticamente. Isto verifica-se porque os elastómeros possuem uma densidade de ligações cruzadas bastante inferior aos termoendurecíveis e, para além disso, possuem uma estrutura “enrolada” o que permite às suas cadeias ter liberdade para se moverem. São muitas vezes utilizados em borrachas e outros materiais elásticos [7]

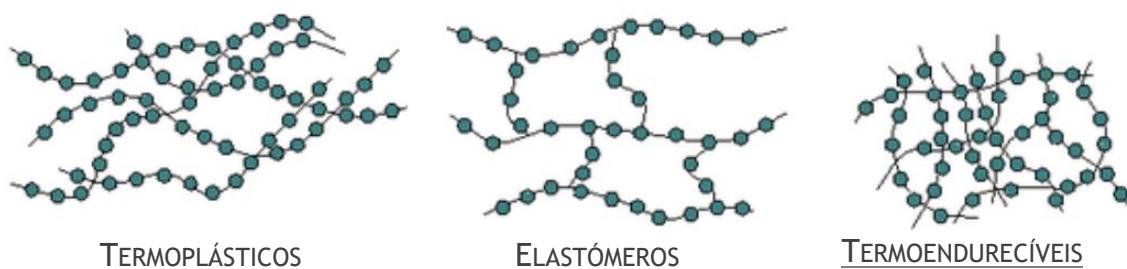


Figura 4 - Organização esquemática das cadeias moleculares dos diferentes tipos de polímeros

Termoplásticos: possuem um comportamento “viscoelástico”, isto é, podem ter um comportamento híbrido entre sólidos elásticos, onde a deformação é proporcional à tensão aplicada ou fluidos viscosos que não possuem forma definida e cuja tensão é diretamente proporcional à deformação imposta [7]. Estes tipos de materiais revelam-se interessantes a nível industrial pois possuem um processamento fácil e rápido podendo por isso desenvolver processos

produtivos muito competitivos que em conjunto com as suas propriedades torna-os num produto de grande consumo. Os fatores que caracterizam estes materiais como: a sua baixa densidade, elevada rigidez, resistência ao impacto e resistência química aliadas ao seu baixo custo e facilidade de reciclar tornam-os extremamente competitivos no que diz respeito à sua importância comercial [5]. As suas aplicações são vastas, assegurando produções de grande tonelagem, sobretudo nas áreas da embalagem, construção civil, indústria automóvel e utilidades. Alguns dos termoplásticos mais importantes a nível industrial estão representados na Figura 5.

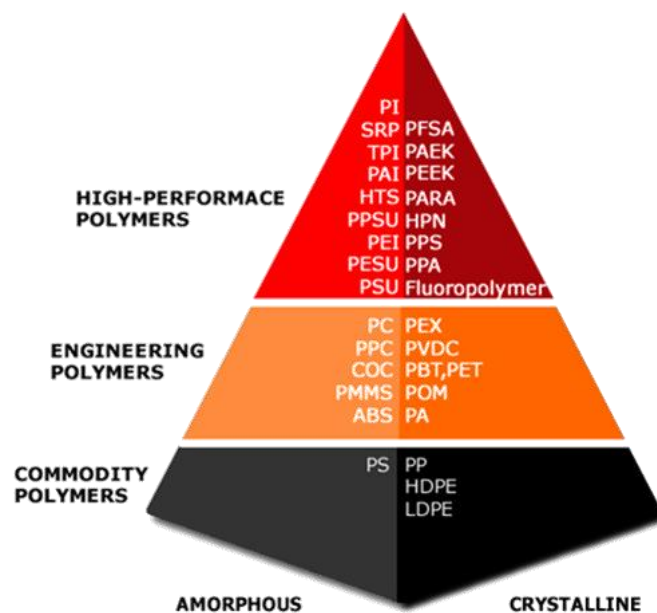


Figura 5 - Classificação comercial de termoplásticos [8]

2.2.2 MÁQUINA DE INJEÇÃO

Os componentes principais da máquina de injeção são: A tremonha, o cilindro de injeção, o fuso e o bico de injeção que se encontram ilustrados na figura 6.

A tremonha é onde o material é armazenado em forma de grânulos para fornecer a máquina de injeção. Encontra-se em cima do cilindro de injeção e permite alimentar a máquina de forma a que esta trabalhe ininterruptamente.

O cilindro consiste num tubo metálico de elevada espessura que aloja o fuso e garante o aquecimento do material através das bandas de aquecimento que abraçam a superfície

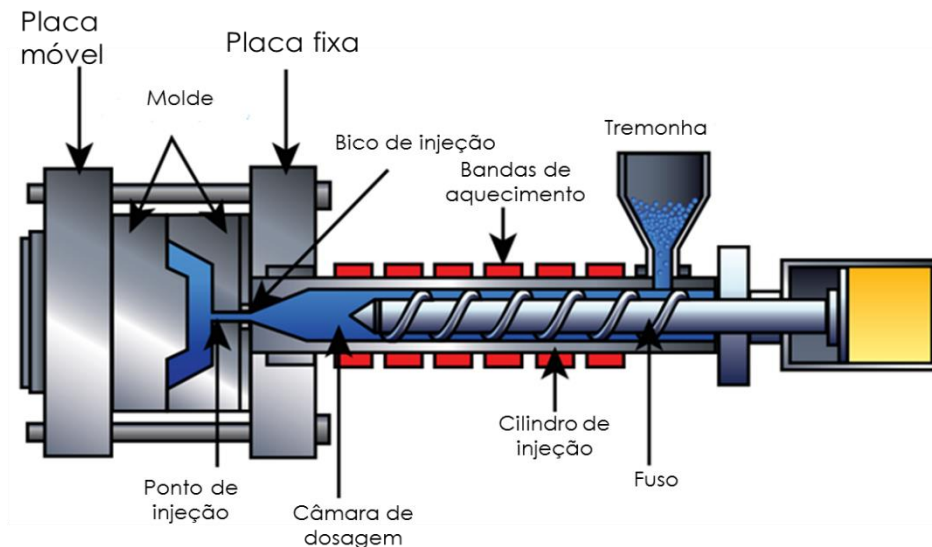


Figura 6 - Esquema de máquina de Injeção [9]

Relativamente ao fuso, este é o responsável pelo processo de plasticização e de transporte de material desde a tremonha até ao bico de injeção [5].

Pode ser dividido em três zonas principais tal como se encontra descrito na Figura 7.

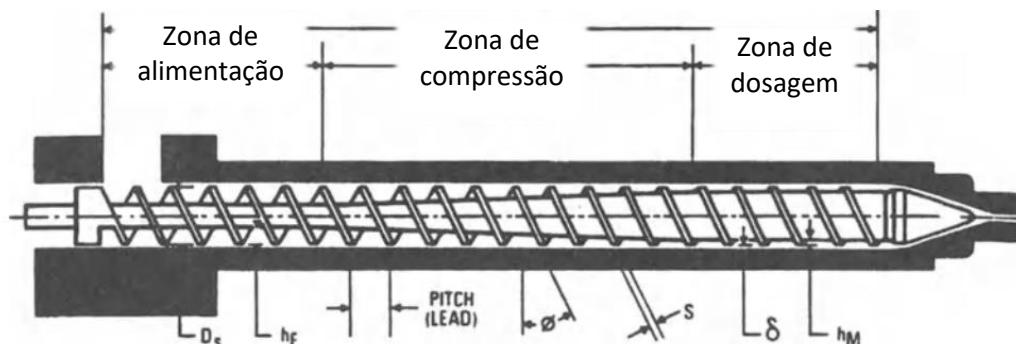


Figura 7 - Vista em corte de um cilindro de injeção de termoplásticos [7]

- Zona de alimentação - efetua o transporte de material para a zona de compressão e pré-aquece o material.
- Zona de compressão - é onde se dá a plastificação do material, com a redução da secção livre e com o aumento da temperatura. Esta secção tem de ser suficientemente longa para assegurar que o material é totalmente fundido.
- Zona de dosagem - zona final, onde a altura dos filetes do fuso é muito reduzida. Homogeneização do material e temperatura uniforme.

É recomendável que a geometria do parafuso seja adequada às propriedades térmicas e reológicas do polímero a processar, no entanto, na

prática são utilizados parafusos universais que permitem o processamento de uma gama alargada de materiais.

O bico de injeção é o que faz a ligação entre o cilindro de injeção e o molde. Este define a qualidade do produto final e o desempenho do processo produtivo. Este deverá manter o material num estado fluido de forma a evitar a solidificação prematura e a oxidação e para além disso deverá evitar o escorrimento para o exterior. Existem vários tipos de bicos de injeção que podem ser classificados como bicos abertos ou bicos fechados.

O processo de injeção envolve um grande número de parâmetros e variáveis que devem estar devidamente ajustadas antes e durante todo o processo para que se otimize o rendimento do mesmo. Estas podem ser classificadas como variáveis operatórias, propriedades do material e parâmetros do processamento [5].

Variáveis operatórias:	Parâmetros de processamento:	Propriedades do material
• velocidade de injeção; • pressão de injeção; • pressão de manutenção; • perfil de temperaturas no cilindro; • temperatura do molde; • contrapressão; • velocidade de rotação do fuso; • velocidade de movimentação do sistema de fecho.	• geometria do bico de injeção; • espessura da peça; • comprimento de fluxo; • localização e geometria do ataque; • distribuição de temperaturas na superfície moldante.	• peso molecular; • viscosidade • estrutura e configuração macromolecular; • sensibilidade térmica; • higroscopicidade; • aditivação; • propriedades térmicas.

2.2.3 CICLO DE INJEÇÃO

O processo de injeção obedece a uma sequência cíclica que pode ser dividida em três fases principais: enchimento, compactação e arrefecimento. O tempo de ciclo é regulado em função do peso da peça, das propriedades do material e das condições de processamento. Neste processo pretende-se o tempo de ciclo mais curto possível, que exija o mínimo de manutenção da máquina durante o tempo de serviço e que garanta simultaneamente a qualidade das peças e a reprodutibilidade das mesmas durante o tempo de vida do molde.

Com o objetivo de assegurar a competitividade económica do processo, tendo em conta o elevado investimento inicial para a instalação, é fundamental a sua otimização.

O enchimento começa com o fecho do molde. Nesta fase, os grânulos de plásticos contidos na tremonha alimentam o cilindro de injeção, onde o fuso em rotação transporta o material fundido sobre pressão em direção ao molde. Na extremidade do fuso, quando se atinge uma quantidade suficiente de material plástico fundido, o parafuso pára e com um movimento similar a um pistão, injeta o material fundido para dentro do molde.

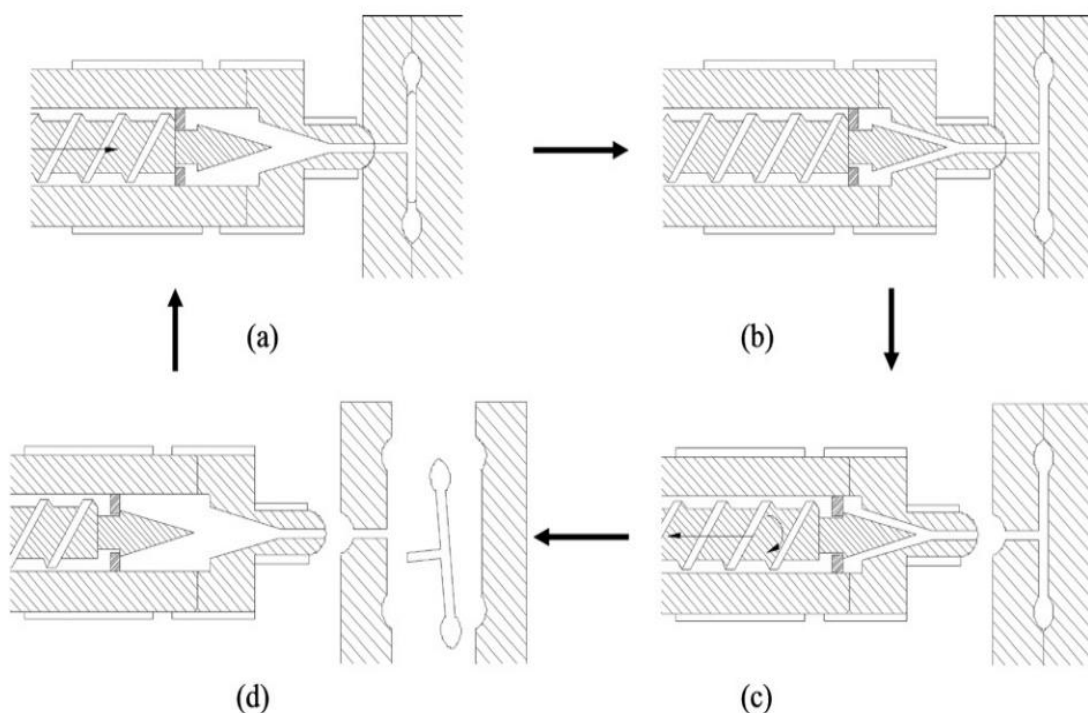


Figura 8 - Ciclo de injeção. a) Fecho de molde ; b) enchimento; c) compactação; d) abertura do molde e extração [4]

Seguidamente, o processo avança para a fase de compactação onde o fuso mantém a pressão aplicada no material introduzido no molde. A necessidade desta etapa surge no sentido de contrariar o efeito da contração do material injetado durante o seu arrefecimento. Esta pressão é mantida durante um curto intervalo de tempo até que a peça esteja fria o suficiente para solidificar. Após o arrefecimento, o molde é aberto e a peça é ejetada. O molde fecha e o processo recomeça [4].

Enquanto se dá a compactação e o arrefecimento da peça, dentro do cilindro de injeção, o fuso recua mantendo a pressão aplicada e é feita uma nova dosagem de material para a injeção seguinte.

A figura 9 elucida sobre o perfil de pressões utilizadas durante todo o processo.

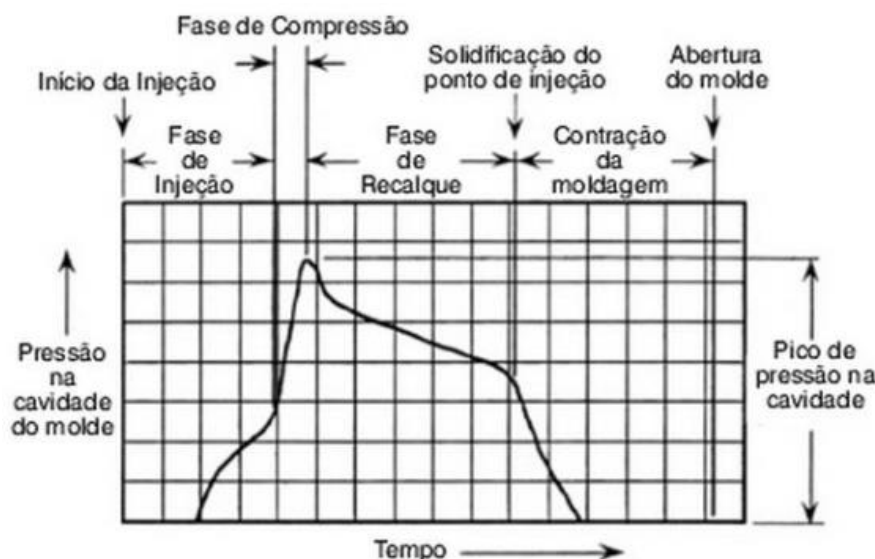


Figura 9 - Perfil de pressões durante a injeção

2.2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO

Um molde de injeção pode ser descrito como um conjunto de elementos que interagem entre si, permitindo que o espaço em que a peça vai ser materializada seja preenchido com plástico fundido de uma forma controlada. Tipicamente um molde é constituído por uma parte fixa denominada cavidade, e uma parte móvel denominada macho. Na parte da cavidade encontram-se vários elementos como, por exemplo, o sistema de injeção, a placa de aperto da injeção e o guiamento, responsável pelo perfeito alinhamento do macho com a cavidade. No macho, que geralmente grava a zona não visível da peça, estão

acoplados calços, guias de centragem, levantadores, movimentos, placa de aperto da extração e o sistema de extração que permite que a peça seja retirada do molde, após abertura do mesmo. A indústria de moldes produz peças de extrema precisão e elevado grau de fiabilidade, pelo que a correta escolha dos materiais constitui um ponto fulcral. Na construção de moldes para plásticos são utilizados diferentes tipos de aços pelo que deve ser feita uma seleção criteriosa de cada tipo de aço para cada parte do molde. O molde é constituído por uma panóplia de elementos e estes podem ser dotados de sistemas especiais que asseguram movimentos, a extração das peças, a monitorização da temperatura e da pressão e o sistema de injeção [5].

Muitas vezes o tipo de injeção é o que define o tipo de molde que é uma decisão crítica uma vez que a sua escolha determina a produtividade e custos operacionais do molde. A finalidade do sistema de injeção é transmitir o fundido da máquina de injeção para a cavidade do molde. Estes sistemas podem ter graus de complexidade diferentes sendo que os mais caros normalmente permitem obter tempos de ciclo inferiores e menos desperdício de material. Tudo depende do volume de produção pretendido, da máquina disponível e do investimento inicial.

O projeto deste sistema é executado em função do tipo de molde. Os moldes podem ser divididos de várias formas, no entanto as famílias principais de moldes são: moldes de duas placas, molde de placa flutuante (utilizada para fazer o pré-corte do gito frio) e moldes com canal quente. Estas configurações são muitas vezes associadas pelo que existem muitas variantes e sub-configurações de moldes.

A imagem seguinte ilustra a diferença entre os dois tipos de sistemas de alimentação. A configuração da imagem da esquerda da figura 10 corresponde a moldes simples de duas placas e de canais frios (figura 10) onde o material desloca-se desde a máquina de injeção até ao plano de apartação e é posteriormente canalizado pelos gitos até à cavidade. Na figura da direita, encontra-se representado uma configuração genérica para moldes de três placas ou com sistema de canais quentes. Este tipo de configuração permite obter uma liberdade muito maior no que diz respeito à localização dos ataques à peça visto que não têm necessariamente que estar no plano de apartação.

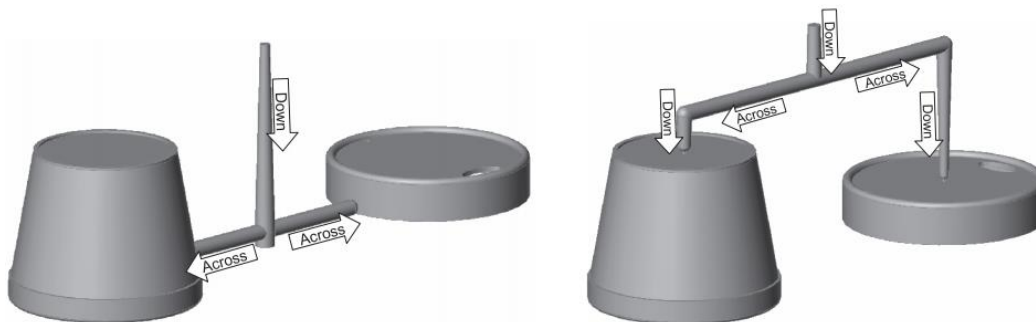


Figura 10- Duas configurações de sistemas de Alimentação de material [11]

2.2.4.1 Moldes de Duas Placas

Os moldes de duas placas (macho e cavidade) são os moldes com a configuração mais básica. Uma das placas, normalmente o macho, fica fixa do lado móvel da máquina de injeção e é normalmente neste lado que é feita a extração da peça. A placa da cavidade fica imóvel do lado do bico de injeção e é nesta posição que se situa todo o sistema de gitagem. Entre as duas placas é formada a peça.

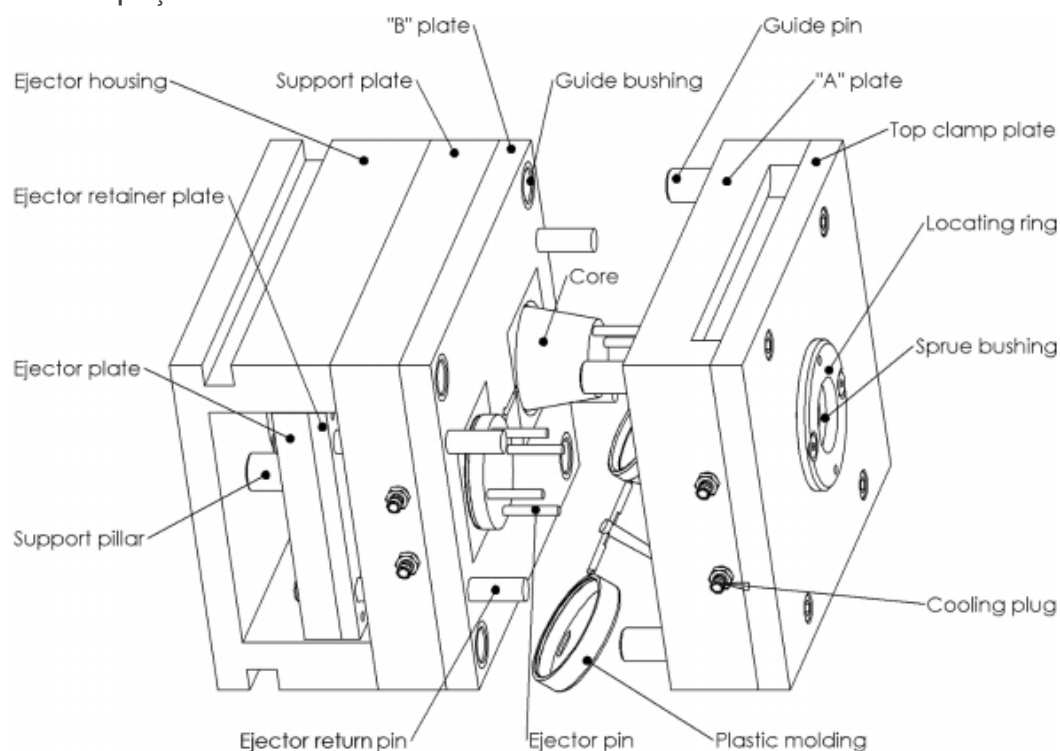


Figura 11 - Vista Isométrica de um molde simples de duas placas durante a fase de extração [11]

2.2.4.2 Moldes de Três Placas

Em moldes de três placas, existe uma placa móvel denominada de placa flutuante que durante a abertura do molde realiza a separação entre os gitos e a peça. Isto permite obter peças no seu estado final ao fim de cada ciclo. Não existe a necessidade de retirar os gitos manualmente. No entanto, este tipo de moldes possui algumas desvantagens como por exemplo, o facto de necessitarem de uma máquina de injeção com grande abertura de forma a possibilitar a extração tanto da peça como do gito. Além disso, o facto de precisar de sistemas de extração para a peça e para os gitos pode fazer com que os custos do molde sejam maiores. Caso o volume do gito seja grande, comparativamente à peça, pode haver um grande desperdício de material e pode haver um aumento do tempo de ciclo para que todo o material solidifique o que vai fazer aumentar o preço por cada peça.

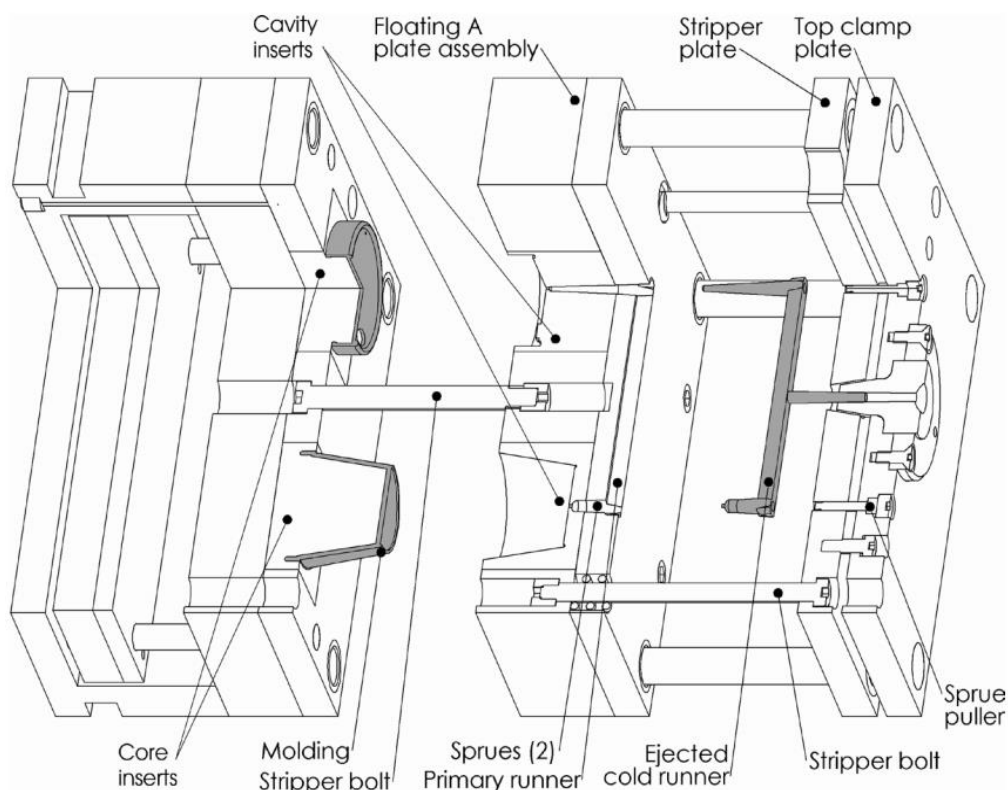


Figura 12- Vista seccionada de um molde de três placas durante a fase de extração [11]

2.2.4.3 Moldes de Canais Quentes

Os moldes de canal quente são semelhantes aos de placa flutuante pelo facto de terem três placas, mas a terceira placa encontra-se fixa. Esta placa aloja o sistema de alimentação que é mantido aquecido para que o plástico se mantenha num estado fluido a todo o momento. Destacam-se por praticamente não possuírem desperdício e terem um tempo mínimo de ciclo. Podem possuir bicos valvulados ou não.

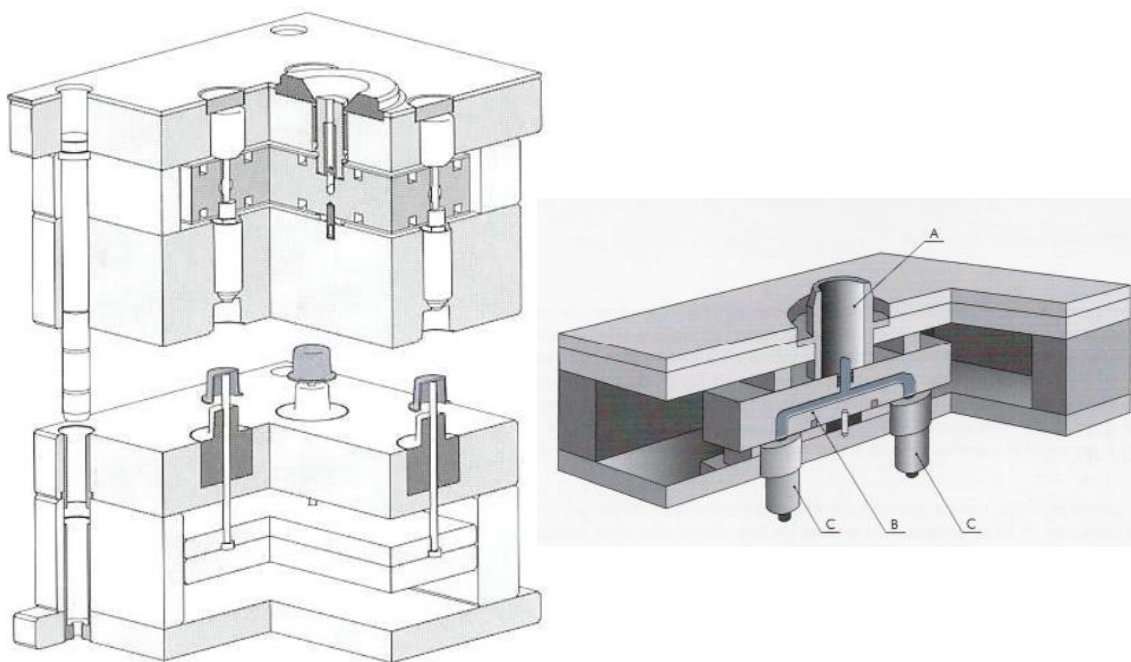


Figura 13 - Vista seccionada de Molde de canais quentes (esquerda) e detalhe da placa do sistema de alimentação (direita) A- Injetor Principal B - Distribuidor C -Bicos quentes [11]

2.3 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES NA INDÚSTRIA DE MOLDES

Como resultado da aplicação extensiva de produtos de injeção, em todos os setores industriais, da procura intensa de moldes de injeção e da sua crescente complexidade, a integração de softwares CAE/CAD/CAM permitiu a esta indústria aumentar produtividade, eficiência e a rentabilidade. O principal objetivo em qualquer destes tipos de software é auxiliar a fase de projeto e de design do molde na tomada de decisões e antecipar possíveis problemas para uma fase inicial do desenvolvimento do molde (onde a modificação do projeto ainda representa pouco investimento). Por fim, assistir no processo de fabrico do mesmo aumentando a rapidez e eficácia de utilização dos meios produtivos minimizando os problemas de produção.

2.4 SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO

Ferramentas como softwares CAE (engenharia assistida por computador) de simulação de injeção são um instrumento eficaz na análise dos complicados fenómenos físicos inerentes à moldação por injeção.

A simulação fornece uma representação visual do preenchimento da cavidade moldante e funciona como um ensaio virtual do molde, permitindo detetar potenciais problemas e corrigi-los na fase inicial de projeto.

Este tipo de software não substitui os conhecimentos fundamentais sobre materiais, projeto de moldes ou processamento de polímeros. No entanto, esta ferramenta tem um valor inestimável, dado que permite complementar os conhecimentos e a experiência profissional do projetista auxiliando na tomada de decisões críticas sobre o planeamento do molde tornando-o mais produtivo e rigoroso nas suas previsões. Estes softwares possibilitam a redução de tempo e dinheiro gasto em alterações e reparações dado que substituem o processo de tentativa e erro. Além disso, permite também detetar problemas em moldes que já se encontram em funcionamento e rastrear a origem de determinado defeito numa peça [5]

Por estes motivos, a aquisição de um software deste tipo representa uma mais-valia para as empresas que produzem produtos como moldes de injeção uma vez que permite tornar o processo produtivo mais eficiente e minimizar custos e riscos financeiros.

Existem várias empresas que comercializam softwares de simulação de injeção. Existem muitos softwares de simulação como o Sigmasoft, o CadMould e o Visi Flow, no entanto, entre os mais conhecidos estão o software Moldflow pertencente à Autodesk e o Moldex3D pertencente à Siemens.

3. ESTADO ATUAL DA PRIFER

3.1 CADEIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM MOLDE NA PRIFER

O processo de desenvolvimento de um molde é um processo dinâmico que vai sendo alterado e ajustado à medida das necessidades, tendo como objetivo geral o cumprimento de prazos de entrega que são normalmente ditados pela data do primeiro ensaio e pela data de expedição do molde.

Numa primeira fase são recebidos os pedidos de orçamento. Após esta receção são enviados para a empresa os ficheiros tridimensionais com a geometria da peça assim como especificações do projeto para que a empresa possa avaliar a complexidade e especificidade do mesmo. Desta avaliação, é possível fazer a orçamentação e estimar o tempo necessário para a execução do molde.

Feita a análise da exequibilidade do projeto e após a adjudicação do mesmo, é feito o projeto que consiste na modelação 3D de todos os componentes do molde e é feita a encomenda de materiais de forma a dar início à sua produção.

Na produção de um molde, este passa por uma enormidade de etapas tanto na fase de maquinação (CNC's, eletroerosão, furação profunda) assim como na “bancada” onde é feita a montagem, ajuste e afinamento de todos os componentes. O planeamento da produção é fundamental, sendo que o mesmo é feito recorrendo a softwares de gestão de projetos que calendarizam e sequenciam as tarefas (maquinação e bancada) com base no tempo de execução e prioridade. Estes softwares dão informações sobre os encargos de determinado setor - da taxa de ocupação de máquinas e dos colaboradores - em determinado momento, e assim auxiliar a tomada de decisões de forma a que os recursos da fábrica sejam otimizados e o cumprimento de prazos seja garantido.

Por fim, o molde passa por uma fase de testes, ensaios e alterações até que tenha a aprovação do cliente. O fluxograma presente na figura 14 elucida através de uma forma clara e resumida como se estrutura o processo produtivo de um molde de injeção de plásticos na PRIFER.

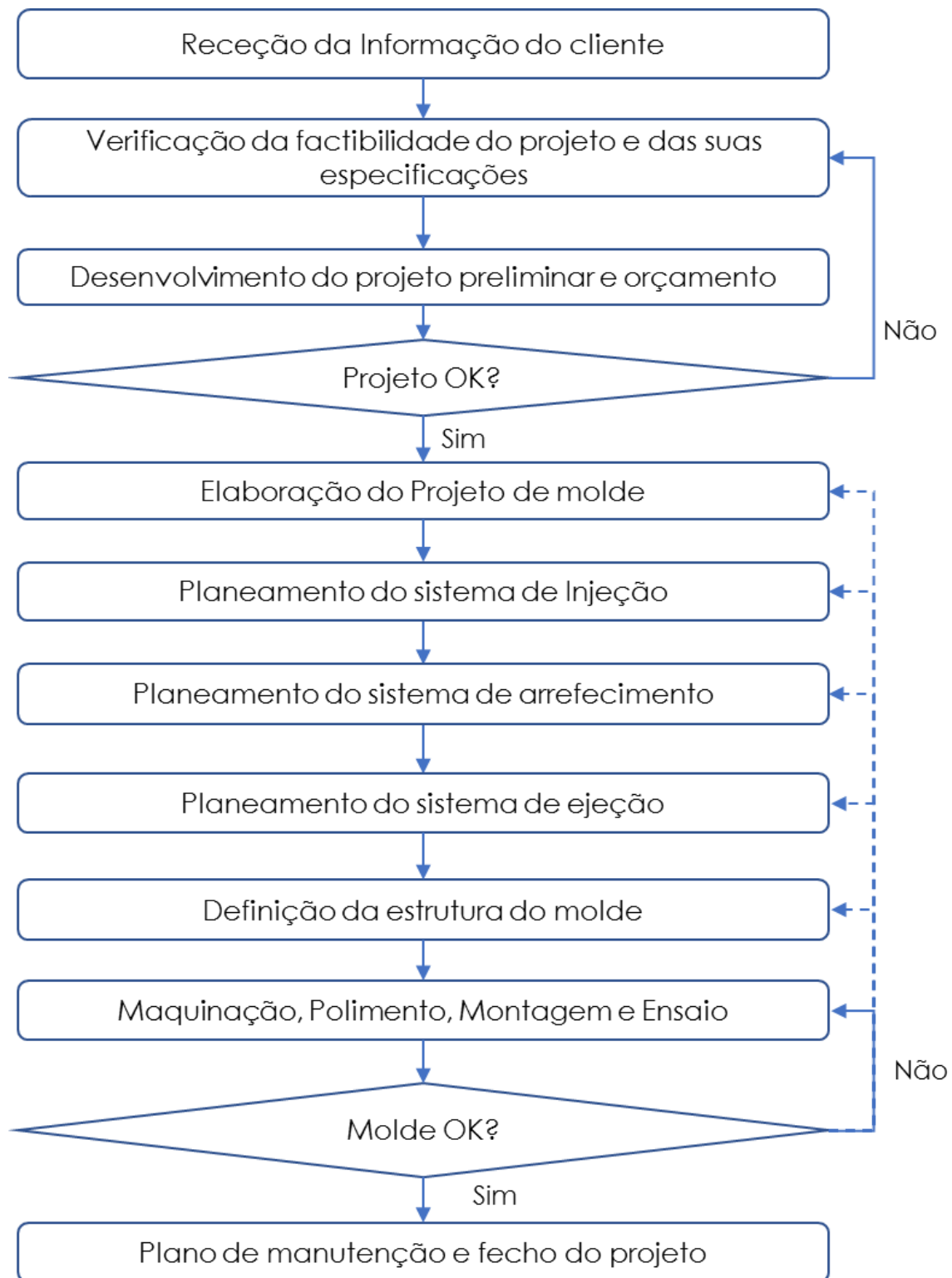


Figura 14 - Fluxograma do processo produtivo de um molde de injeção de termoplásticos na PRIFER

3.2 ENSAIO DE MOLDE NA PRIFER

Um ensaio de molde da PRIFER começa com a montagem do molde na máquina de injeção. Nesta etapa, o molde é colocado e fixo na máquina de injeção e são feitas todas as ligações, quer do sistema de arrefecimento do molde, quer da parte eletrónica relativa aos sistemas de segurança e sistema de injeção. Seguidamente, é feita uma verificação do funcionamento global do molde. Nesta fase são realizados ciclos a vazio, isto é, sem que haja injeção de material (abre o molde, avança a extração, recua a extração, fecha o molde e assim se repete). Isto permite realizar uma inspeção visual e verificar se os sistemas de extração, os movimentos do molde e todos os elementos móveis estão a operar devidamente. É importante que este passo seja feito com o molde à temperatura de trabalho, caso contrário, a dilatação do aço pode impedir o correto funcionamento do mesmo.



Figura 15 - Inspeção visual do sistema de extração

Após esta verificação, são feitos vários ciclos de injeção já com a entrada de material no molde. Esta etapa destina-se exclusivamente à definição da fase de enchimento do molde pelo que não é realizada a etapa de compactação. É feito um enchimento com uma velocidade de rotação e avanço do fuso baixa de forma a garantir que o molde é estruturalmente sólido e que o sistema de

injeção funciona como o esperado. De seguida, é feita a abertura sequencial dos bicos de injeção até que a peça esteja completamente formada e são afinados os parâmetros de injeção como as pressões de injeção, o volume a injetar e velocidade de injeção. Este é um processo iterativo que termina assim que não se verifiquem mais defeitos relacionados com o enchimento da peça.

Segue-se a etapa de definição do perfil de compactação. Primeiramente, é estabelecida uma pressão de compactação (normalmente 85% da pressão de injeção) e é programado um tempo exagerado de compactação. Este tempo deve ser o tempo máximo até que os ataques “congelem” e não seja possível compactar mais material para dentro da cavidade. Caso se verifiquem defeitos como chupados e faltas de compactação, é sinal que a pressão é demasiado baixa e deve ser aumentada.

De seguida, é feito um controlo da massa da peça à medida que se diminui sucessivamente o tempo de compactação. Se a massa da peça diminuir é porque o tempo de compactação não pode ser mais reduzido para a mesma pressão. É possível fazer uma redução do tempo de compactação e assim do tempo de ciclo, aumentando a pressão. O gráfico abaixo ilustra o procedimento de afinação do tempo de compactação.

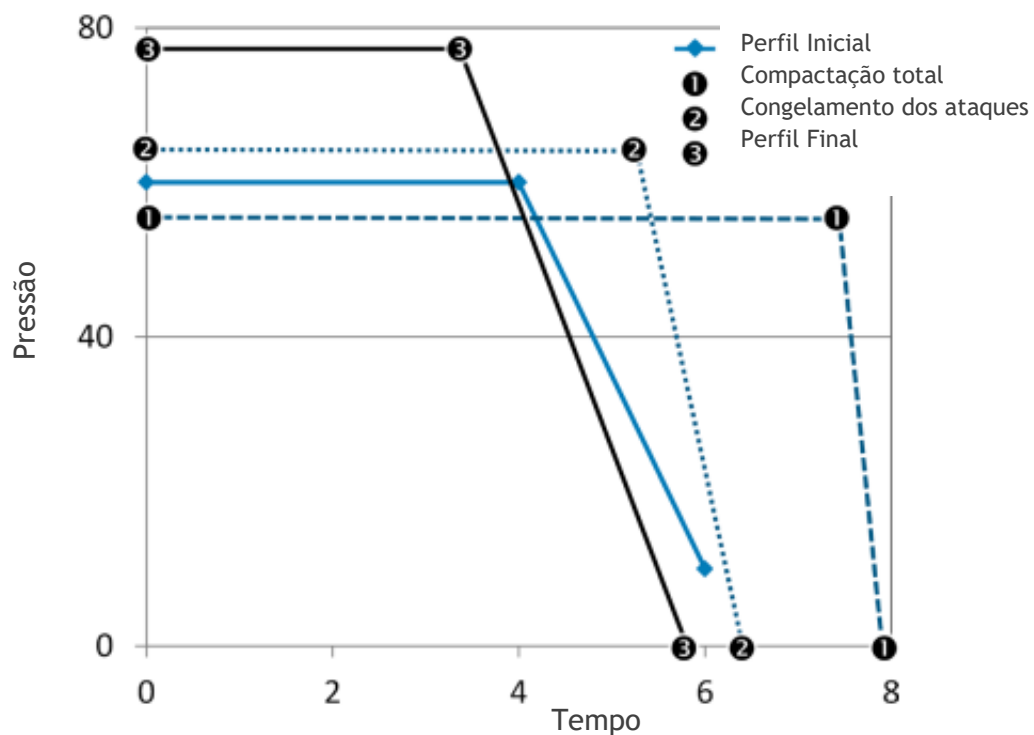


Figura 16 - Evolução típica de um perfil de compactação [14]

No caso específico da Prifer, os ensaios seguem uma nomenclatura que os classifica segundo a seguinte ordem:

- **Ensaio T0** - (ensaios internos PRIFER) este ensaio serve para verificar o correto funcionamento do molde e verificar a geometria da peça. É feito antes do ensaio com o cliente de forma a que, caso existam problemas, haja tempo de corrigir, de forma a que tudo corra como o esperado no ensaio oficial.
- **Ensaio T1** - 1º ensaio com o cliente presente. Tem sempre produção de peças sendo registadas as alterações pretendidas pelo cliente. A partir daqui, depende do cliente ou das necessidades do projeto.
- **Ensaio T2** - 2º ensaio com o cliente presente. É feita uma retificação das observações feitas em T1 e a validação do funcionamento automático do molde. Neste ensaio, todos os pontos devem estar corrigidos e todos os sistemas de segurança devem estar instalados. Aqui são feitos entre 500 a 2000 ciclos a vazio e há produção de peças. Após este ensaio, o molde é aprovado para textura e é desmontado o molde na presença do cliente.
- **Ensaio T3** - 3º ensaio com o cliente para a validação de textura. É feita a produção de peças para a aprovação da textura. e são registados defeitos de “raspados”. Este tipo de defeito é uma terminologia técnica utilizada para descrever zonas em que o acabamento superficial da peça é de baixa qualidade. Tem origem na extração da peça em zonas onde a textura se encontra em contra-saída. Para moldes sem textura, normalmente, este é o ensaio para a aprovação final antes envio
- **Ensaio T4** - 4º ensaio com o cliente realiza-se o ensaio de validação final, ou seja, a produção de peças após as retificações do ensaio anterior. Idealmente este é o ensaio final, no entanto, mais ensaios podem ser feitos a pedido do cliente por causa de alterações à geometria de peça.

3.3 UTILIZAÇÃO DE MOLDFLOW NA PRIFER

As encomendas recebidas pela PRIFER são tradicionalmente constituídas pelas especificações previstas pelo cliente para o molde, com base no orçamento previsto, na quantidade de peças a produzir e em função da peça em si que é geralmente acompanhada por um estudo de injeção por parte do cliente. Muitas vezes, o estudo de injeção é realizado através da subcontratação de empresas especializadas. A grande desvantagem do recrutamento destas empresas é que, embora possuam um vasto conhecimento na utilização dos softwares, existem falhas de comunicação ou estes podem não estar perfeitamente conscientes das restantes envolventes do molde e consequentemente tomar decisões erradas como, por exemplo: posicionar bicos de injeção em zonas impossíveis onde existem movimentos, circuitos de arrefecimento ou extratores; realizar o estudo sem ter ideia do tipo de máquina onde o molde irá ser montado; estudos mal feitos;

Caso exista alguma falha de comunicação entre as empresas ou algum projeto mal desenvolvido por estas, existe o risco de um molde ser fabricado com base em princípios errados e funcionar incorretamente, podendo produzir peças defeituosas, com baixa qualidade ou até mesmo nem ser capaz de as produzir. Os prejuízos para as empresas de moldes podem ser extremamente elevados. Por vezes, só no ensaio é que são detetados defeitos relacionados com a injeção e para além de ser difícil reparar algo que está mal idealizado desde início, estes provocam grandes atrasos que acarretam prejuízos de montante elevado a todos os envolvidos.

Embora a Prifer possua licenças de Autodesk MoldFlow Insight, este recurso não é explorado por diversos motivos, entre os quais, o facto da estratégia de negócio da empresa passar pela aceitação de clientes que subcontratem este serviço.

Isto permite que a definição do sistema de injeção (localização dos pontos de injeção e configuração do sistema) seja da responsabilidade do cliente. Permite poupar os custos de estudos de Moldflow, que é um software de difícil aprendizagem e que exige conhecimentos de materiais e pessoas especializadas em MoldFlow, tornando assim estes estudos caros..

De momento, a licença encontra-se a ser utilizada apenas pela PRINEMO.

4. MOLDFLOW

O Moldflow um software criado na Austrália, pela empresa Moldflow PTY. Ltd. em 1978, quando seu fundador, Colin Austin, criou o software, no sentido de resolver as dificuldades de trabalhar com plástico. Na altura, o mercado de software de simulação era relativamente pequeno e a empresa não ganhou dimensão, até que em 1996 foi adquirida pela Ampersand Ventures e se mudou para Boston, nos Estados Unidos. Nesta fase, expandiu significativamente a sua linha de produtos e entrou com força nos mercados de simulação, obtendo uma receita anual cerca de 10 milhões de dólares logo no primeiro ano. A empresa continuou a crescer e a conquistar outras empresas rivais até que em 2008 foi adquirida pela Autodesk por 297M \$ [12], [13].

4.1 FUNCIONALIDADES DO SOFTWARE

Num estudo de Moldflow, as análises podem ser realizadas segundo diversas sequências de acordo com o que se pretende ou segundo sequências pré-determinadas pelo cliente. Esta sequência abaixo começa com uma análise de enchimento, compactação, arrefecimento e por fim empeno.

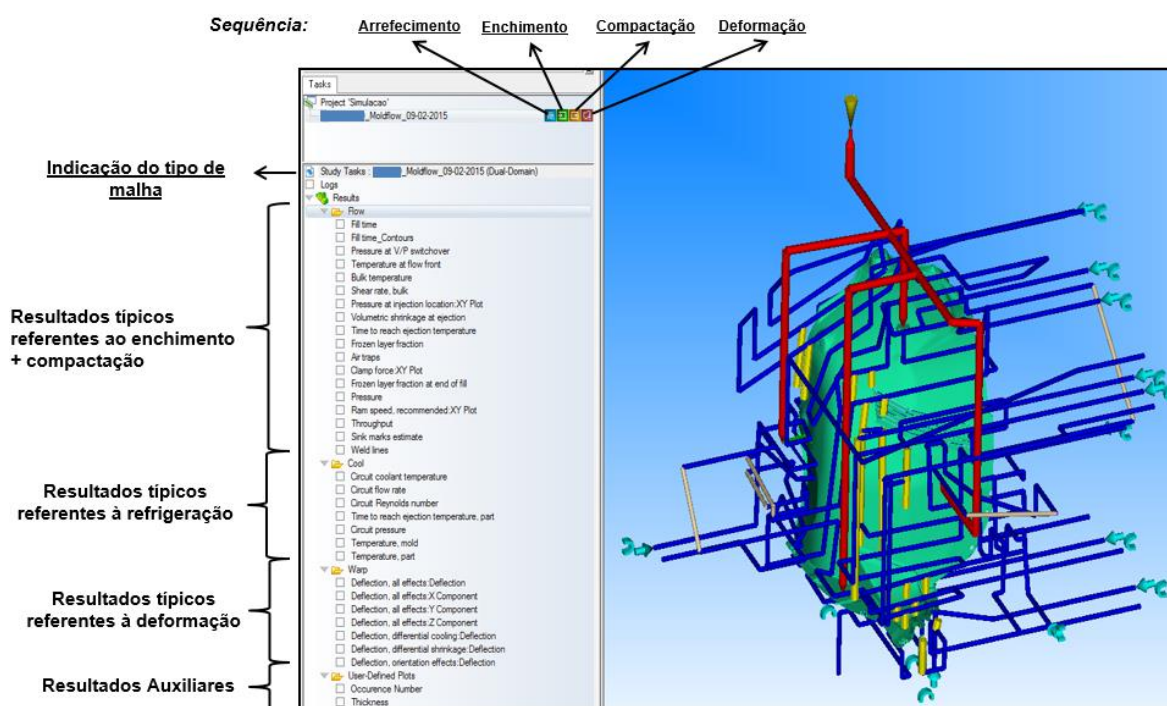


Figura 17 - Interface do Software

4.1.1 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO E COMPACTAÇÃO

O desempenho do sistema de injeção tem uma influência direta no bom funcionamento do molde e na qualidade da peça produzida. Entre as várias etapas do projeto de molde, existe a fase de projeto do sistema de injeção onde são feitos estudos de enchimento e compactação. Nestes estudos são feitas simulações de forma a encontrar a melhor estratégia de injeção, assim como as condições ideais de processamento. A partir destes estudos, é possível cooperar com a equipa de projeto de forma a que o molde seja concebido da melhor maneira possível, assegurando a produção de peças com o mínimo de defeitos. É também possível simular o enchimento com materiais com fibras e outro tipo de cargas.

Alguns dos resultados mais importantes desta simulação são:

- Tempo de enchimento- mostra a posição da frente do fluxo em intervalos regulares à medida que a cavidade enche e a velocidade a que o polímero flui.
- Pressão no ponto de comutação - O ponto de comutação define-se como o ponto em que o enchimento da cavidade passa de um controlo de velocidade para um controlo por pressão. Este resultado indica-nos as últimas zonas da peça a serem cheias, dando informação acerca do balanceamento da peça e também de zonas sobre-compactadas.
- Temperatura na frente de fluxo - Este resultado mostra a temperatura do fundido quando a frente de fluxo alcança um ponto específico no centro da secção da cavidade. Variações grandes de temperatura de frente de fluxo poderão ter variadas causas, entre elas: ataque demasiado estrangulado; tempo de injeção desapropriado; local de injeção inadequado; hesitações; viscosidade do material, entre outras.
- Temperatura do fundido - Este resultado permite observar a temperatura média ponderada ao longo da espessura. Por ser um resultado em animação, permite ver temperaturas ao longo do tempo. Grandes diferenciais de temperatura podem causar contrações não-uniformes e consequentemente originar empenos.
- Taxa de corte - A taxa de corte define-se como sendo a taxa de variação da deformação de corte com o tempo. Cada de tipo de material possui

uma taxa de corte máxima, para o qual poderá ocorrer degradação do material. Variáveis como secção de ataques à peça, seleção do material (materiais menos viscosos) e tempos de injeção poderão ser alterados para baixar a taxa de corte.

- Contração volumétrica na ejeção - Este resultado mostra a contração em volume para cada área expressa em percentagem, nomeadamente, o decréscimo de volume local do fim da fase de arrefecimento até quando a peça é arrefecida para a temperatura ambiente (temperatura de referência = 25°C). Este resultado é bastante útil para detetar zonas onde podem ocorrer “chupados” e para verificar a uniformidade de contrações de forma a reduzir os empenos. Normalmente, a contração volumétrica é maior em zonas mais espessas e em zonas mais distantes dos bicos, que não compactem tão eficazmente e em zonas de ataque difíceis de refrigerar.

4.1.2 SIMULAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Durante o ciclo de injeção, a fase de arrefecimento é aquela que, geralmente, consome mais tempo (cerca 60% do tempo total de ciclo). Na produção de componentes em materiais termoplásticos moldados por injeção existe um interesse particular em maximizar a cadência de produção das máquinas de injeção, devido ao custo do produto e do equipamento, respetivos moldes e mão de-obra envolvida. Por outras palavras, procura-se o tempo mínimo indispensável que permita a obtenção da força e rigidez suficiente para que a peça possa ser extraída, garantindo uma peça com qualidade.

As propriedades mecânicas e qualidade superficial do produto dependem muito do seu arrefecimento e, ainda que se procure o menor tempo possível por questões económicas, é necessário ter em atenção que arrefecimentos muito rápidos podem originar tensões residuais que causem distorções ou mesmo fissuração das peças. Assim, se por um lado convém que o arrefecimento das peças seja feito tão rapidamente quanto possível, por outro, existe a necessidade de garantir a qualidade da moldação.

O arrefecimento da peça é feito por canais de refrigeração independentes que são maquinados em função de todos os sistemas presentes no molde

(injeção, movimentos, curso de extração, etc...) e acompanham a superfície da cavidade moldante de forma a garantir uma extração controlada do calor da peça.

Os canais podem ser em série ou em paralelo, sendo que os circuitos em série são os mais utilizados e recomendados pelo facto de manterem sempre o mesmo caudal.

Quando se pretende arrefecer localmente uma determinada zona do molde onde a extração de calor é difícil, aplica-se uma palheta. Elas funcionam como um defletor do fluxo de água e aumentam a turbulência do fluido o que promove a remoção de calor. Permitem obter circuitos de arrefecimento mais eficientes e resolver problemas de concentração de calor. A imagem seguinte explica o funcionamento de uma palheta.

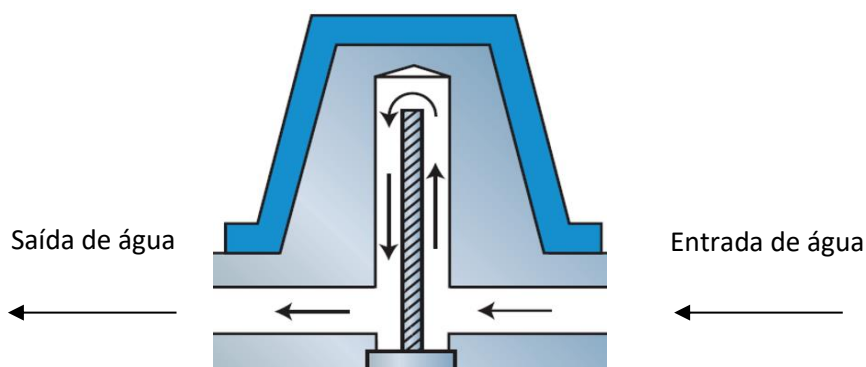


Figura 18 - Esquema de funcionamento de uma palheta

O processo de arrefecimento de uma peça depende da sua espessura, da temperatura do fluido arrefecedor e do respetivo caudal, do diâmetro e configuração dos canais de arrefecimento, das propriedades físicas do polímero e do material do molde.

Alguns dos resultados mais importantes deste tipo de simulação são:

- Temperatura do líquido de refrigeração - Este resultado mostra a temperatura do líquido arrefecedor ao longo do circuito de água. O aumento de temperatura não deverá ultrapassar $2/3^{\circ}\text{C}$ para que a eficiência da refrigeração seja uniforme ao longo da cavidade/molde.
- Caudal no circuito - Este resultado mostra o caudal do refrigerante no interior do circuito. Para um circuito em série o caudal é constante, no entanto, se o circuito for em paralelo, o caudal poderá divergir consoante a queda de pressão em cada circuito.

- Numero de Reynolds - Este resultado mostra o numero de Reynolds em cada circuito. O nº de Reynolds quantifica a turbulência do líquido refrigerador, sendo que quanto maior o nº de Reynolds, mais turbulento é o fluxo. Este nº é calculado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

D – Diâmetro do canal de arrefecimento
v- Velocidade média do líquido
ρ - densidade do líquido
μ - Viscosidade do líquido

A tabela 1 indica os regimes de escoamento em função do nº de Reynolds.

Tabela 1 - Regimes de escoamento

Regime de Escoamento	Número de Reynolds
Turbulento	Re > 4000
Transição	2300 > Re > 4000
Laminar	100 > Re > 2300
Estagnado	Re < 100

O efeito da transferência de calor aumenta à medida que o regime passa de laminar para turbulento. Para o regime laminar o calor é transferido camada a camada por condução. No regime turbulento além de transferência de calor por condução há também transferência de calor por convecção o que aumenta bastante a remoção de calor e a eficiência do arrefecimento. A figura 19 ilustra os dois tipos de regimes.

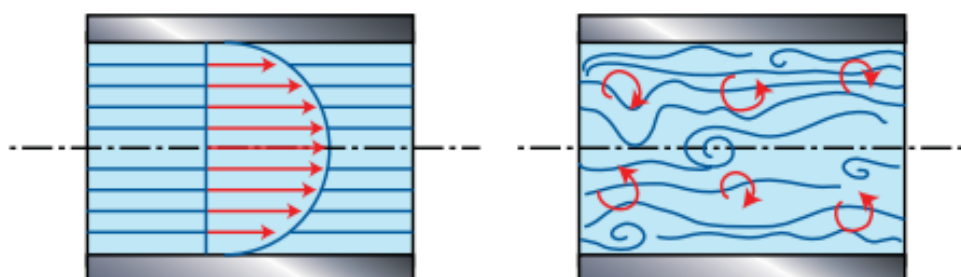


Figura 19 - Ilustração de um escoamento laminar (esquerda) e turbulento (direita)

Em circuitos de refrigeração de moldes, o numero de Reynolds deverá ser próximo de 10 000.

- Temperatura do metal - Este resultado mostra o aumento/decréscimo de temperatura do metal por onde passa o refrigerante ao longo do circuito. A temperatura não deverá ultrapassar 5°C de diferença em relação à

temperatura do líquido à entrada. Este valor será mais elevado em zonas mais quentes da peça e/ou circuitos demasiados perto da peça.

- Pressão do circuito - Este resultado mostra a distribuição da pressão ao longo do circuito. Uma elevada queda de pressão nos circuitos de refrigeração poderá ter várias causas não devendo ser este valor maior que a capacidade da bomba de refrigeração.
- Temperatura do molde - Este resultado mostra a temperatura na interface do molde e é usado para localizar zonas quentes e/ou frias do molde que irão afetar o tempo de ciclo e o empeno da peça. A temperatura deverá ser o mais uniforme possível.
- Temperatura da peça - Este resultado mostra a temperatura média na fronteira da peça. A temperatura da peça deverá ser o mais uniforme possível. Em geral, o gradiente de temperatura na peça no lado da cavidade não deverá exceder 10°C e no lado macho 15°C. A temperatura entre a superfície da cavidade e macho num mesmo ponto não deverá ser superior a 15°C de forma a evitar diferenciais de contração entre as superfícies da peça e a formação de tensões internas.

4.1.3 SIMULAÇÃO DE EMPENOS

O estudo de empenos tem como função prever o desvio de cotas que a peça sofre ou não após a desmoldagem. Este estudo reflete as etapas e decisões tomadas. As otimizações dos empenos de uma peça tornam-se no fundo como uma validação de todo o trabalho desenvolvido, desde o design da peça, à definição da injeção e até ao arrefecimento do molde. Para que uma peça seja validada, por vezes a solução de um empeno poderá implicar refazer uma ou várias das etapas feitas anteriormente.

O empeno de uma peça plástica tem origem em quatro fatores principais: Arrefecimento e contração heterogéneos, efeito de canto e orientação do material. Interessa perceber qual destes fatores é o principal responsável pelo empeno das peças. Após averiguar qual a causa dominante para os empenos registados é necessário tomar medidas corretivas necessárias em função do problema identificado.

5. TRABALHO DESENVOLVIDO

5.1 CASO DE ESTUDO

Na unidade curricular de “Seminário” foram iniciados estudos de enchimento e compactação. De forma a entender todas as potencialidades do Software e exigências de otimização das condições de processamento de uma peça plástica, optou-se por dar continuidade ao trabalho, sendo que se fez um estudo completo de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno à peça ilustrada na figura 20.

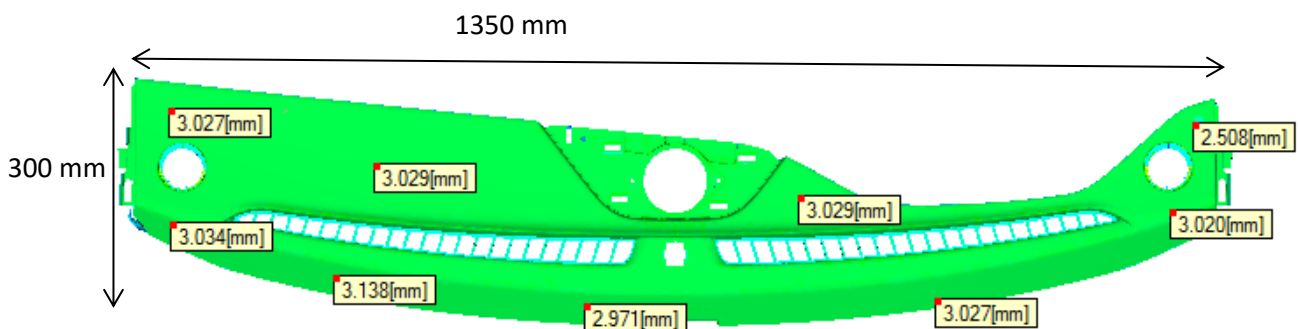


Figura 20 - Peça estudada e respetivas dimensões

5.1.1 ESTUDO DE ENCHIMENTO

No relatório de seminário a etapa de geração de malha da peça foi abordado em profundidade pelo que não será explorada neste trabalho, no entanto encontra-se em anexo para uma melhor contextualização.

O material designado para esta peça é um polipropileno modificado específico para a injeção de plásticos de interiores de automóveis com um nome de código SABIC® PPcompound 9156. Este material distingue-se por estar otimizado para ter maior fluidez, dureza (resistência a riscos) e rigidez. No anexo 9.2 estão também as propriedades mecânicas e térmicas do material.

Após várias simulações, a estratégia de injeção escolhida foi de injeção com cinco ataques valvulados. Os ataques utilizados possuem a configuração de injeção submarina oblonga com as dimensões presentes no anexo 9.3. Foi escolhido este tipo de ataque pelo facto de ser cortado automaticamente com a abertura do molde e por deixar marcas muito pouco visíveis na peça.

As válvulas foram programadas para que se desse a abertura do bico N1 logo no início do bico de injeção e depois aos 3,7 segundos, abriam os restantes bicos (N2, N3, N4, N5). No anexo 9.4 encontram-se imagens elucidativas da sequência de enchimento assim como todos os resultados principais.

Todos os parâmetros de injeção utilizados para esta simulação encontram-se no anexo 9.5. Na tabela 2 encontram-se resumidos os parâmetros principais.

Tabela 2 - Parâmetros de Injeção

Tempo de injeção	6s
Temperatura do molde	50°C
Temperatura do fundido	240°C
Ponto de comutação	98% do volume injetado
Tempo de compactação	20s
Pressão de compactação	41MPa
Força de Fecho Mínima	≈870 Ton

Com esta estratégia de injeção e com a sequência de válvulas utilizada, foi possível obter um enchimento balanceado e com o fluxo do material orientado. Na imagem presente no anexo 9.4 é possível constatar o correto balanceamento através do resultado da pressão no ponto de comutação.

Dois resultados que sugerem que os cinco bicos de injeção são suficientes é o resultado da temperatura da frente de fluxo e da contração volumétrica.

Relativamente ao primeiro resultado, é possível ver que o gradiente térmico ao longo de toda a peça se encontra dentro dos limites aceitáveis ($\Delta T < 15^{\circ}\text{C}$).

Pelo resultado da contração volumétrica, verificou-se que existe alguma dificuldade em compactar as extremidades da peça, que são as últimas zonas a encher, mas que a contração da peça de uma maneira geral é praticamente a mesma. Isto indica que a peça contrai à mesma taxa em todo o seu volume e que o material na peça possui a mesma compactação.

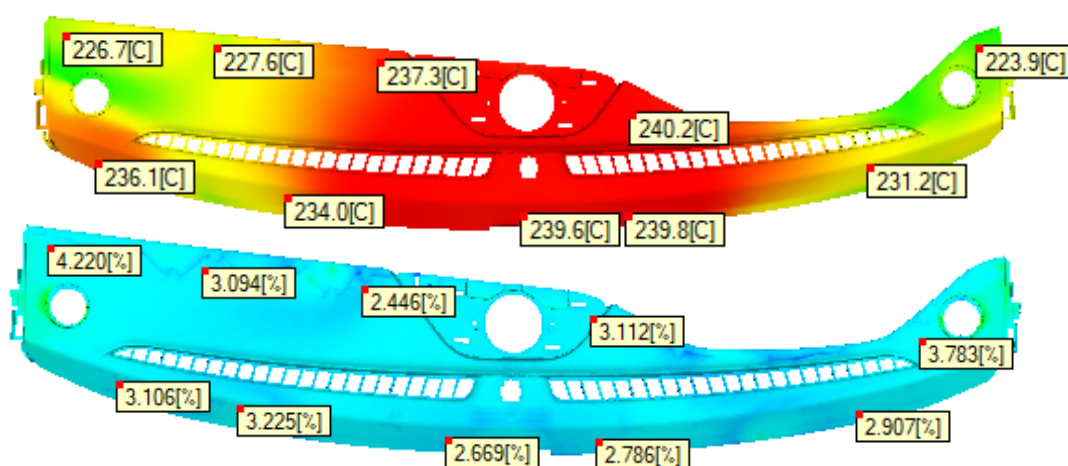


Figura 21 - Temperatura da frente de fluxo (cima) e contração volumétrica (em baixo)

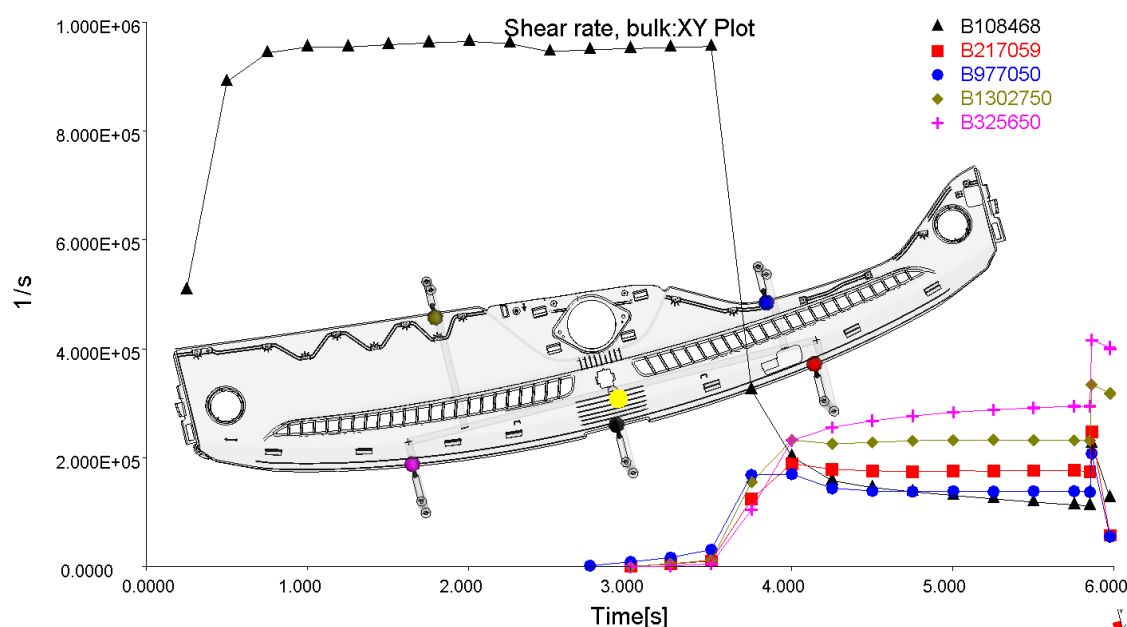


Figura 22 - Taxa de corte em cada ponto de injeção

Analisando o resultado da taxa de corte em cada ponto de injeção, podemos constatar que os ataques se encontram um pouco “estrangulados”. O limite da taxa de corte para este material é de cerca de 100 000 Rad/s e podemos ver que no ataque central, onde é injetada a maior quantidade de material, o valor da taxa de corte é muito superior. Por vezes, durante a produção do molde os ataques são dimensionados mais pequenos do que o normal de forma a que a marca que deixam seja menos visível. Caso o efeito da degradação de material seja visível, através de um simples desbaste manual é possível aumentar a secção de ataque e assim a diminuir a taxa de corte.

Foram observadas prisões de ar junto dos frisos no centro da peça e junto às fixações “porta-agrafo”. No anexo 9.4 encontra-se uma imagem elucidativa deste problema. O ar que se encontra junto das fixações não é problemático uma vez que pode escapar pelos movimentos que os formam, no entanto, pode haver problema na zona dos frisos que é uma zona de espessura fina e por isso de maior fragilidade.

Além disso, o estudo de Moldflow sugere que possam existir linhas de soldadura nestes mesmos frisos, que apesar de não constituírem um problema a nível estético, podem fragilizar ainda mais esta zona da peça caso sejam formadas a temperaturas baixas. Estes resultados encontram-se no anexo 9.4

5.1.2 ESTUDO DE ARREFECIMENTO E EMPENO

Tradicionalmente, num estudo de arrefecimento, o sistema de refrigeração é fornecido pelo projetista de molde sob a forma de curvas. Estas curvas são uma simplificação dos canais de arrefecimento presentes no modelo 3D do molde.

Para a modelação do sistema de arrefecimento, são necessárias as curvas guia dos canais de arrefecimento. Estas curvas são devem ser corrigidas e devem ser-lhes atribuídas diferentes propriedades.

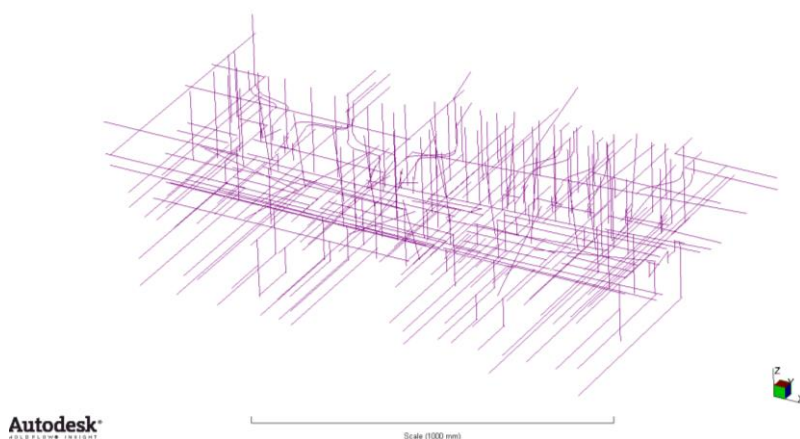


Figura 23 - Aspeto das curvas guia depois de importadas para o Moldflow, antes da correção e da designação de propriedades

Para esta peça existiam 30 circuitos de arrefecimento (13 do lado da cavidade e 17 do lado do macho). Aos circuitos de arrefecimento propriamente ditos foi atribuída a propriedade *channel* e os diâmetros utilizados foram: Ø6mm; Ø8mm; Ø10mm; Ø12mm e Ø15mm. Para as “palhetas” foi escolhida a

propriedade *baffle* e foram utilizadas palhetas de Ø10; Ø19 e de Ø24mm. Às curvas que se encontravam fora do molde, foi designada a propriedade de *hose* com Ø9mm. Estas propriedades fazem com que o software contabilize taxas de transferência de calor diferentes para as diferentes curvas. Para os elementos *hose*, como não possuem troca de calor com o exterior, a taxa de transferência de calor é considerada 0; para os *baffle* 0.5 e para os *channel* 1. Depois de gerada a malha, é necessário proceder à sua correção e verificar se há elementos intersetados, sobrepostos e/ou desconectados. No fim são definidas as entradas do fluido refrigerador. Na figura 24 é possível ver o sistema de arrefecimento depois de gerada a malha. Os elementos *channel* estão representados a azul, as palhetas a amarelo e os elementos *hose* a bege.

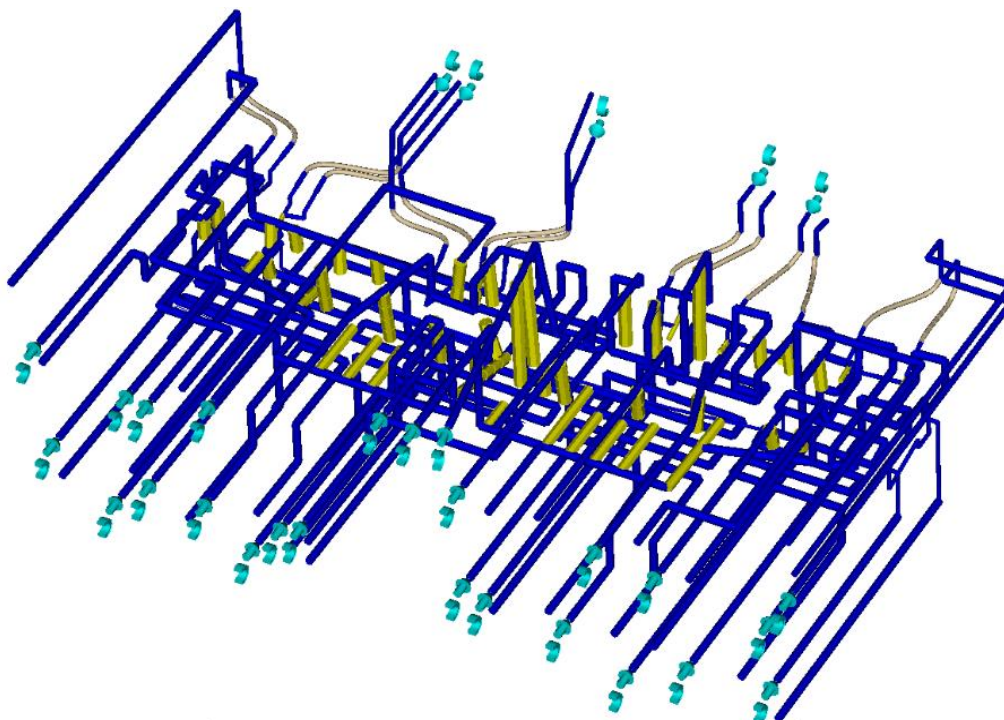


Figura 24 - Sistema de arrefecimento utilizado após gerar a malha

Para dar início à simulação de arrefecimento e empeno, é necessário definir alguns parâmetros de entrada que permitam ao software fazer o cálculo. Estes devem estar corretamente definidos para que os resultados da simulação possam ser fidedignos e para que correspondam efetivamente ao que acontece numa situação real. No anexo 9.6 estão todos os parâmetros utilizados para a análise, no entanto, na tabela 3 encontram-se resumidos os parâmetros que afetam diretamente a análise de arrefecimento.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na análise de arrefecimento

Líquido de refrigeração	Água
Temperatura do líquido de refrigeração	20°C
Caudal do líquido de refrigeração	15 l/min
Temperatura do molde	50°C
Temperatura do fundido	240°C
Temperatura ambiente	25°C

Em anexo encontra-se também uma imagem do aspeto final do modelo pronto para a análise. É possível ver em conjunto todos os elementos do sistema de injeção, do sistema de arrefecimento e da peça.

5.1.2.1 Análise de Resultados

Utilizando o resultado da temperatura do líquido de refrigeração é possível ver que os circuitos asseguram uma temperatura uniforme em todo o molde. A temperatura dos circuitos de águas aumenta ligeiramente, sendo que a variação de temperatura é inferior a 1°C e que o aumento de temperatura em

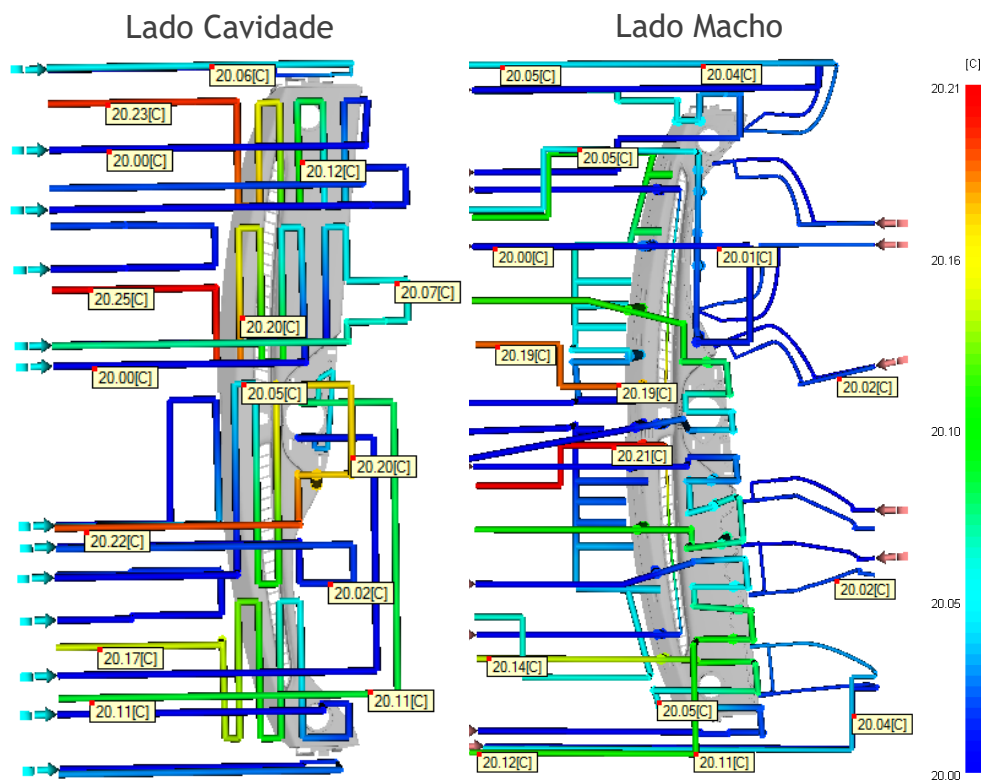


Figura 25 - Temperatura do líquido de arrefecimento

todos os circuitos é idêntico. Isto garante uma temperatura constante no molde e assegura que existe reprodutibilidade das peças ao longo do tempo com os vários ciclos de injeção e que o molde opera de maneira consistente.

Outro resultado que sustenta a eficiência deste sistema de arrefecimento é o n° de Reynolds. Segundo o estudo efetuado, todos os circuitos possuem um n° de Reynolds superior a 16000 o que não é ideal, mas que certifica que existe um regime turbulento que promove a extração de calor. Em condições ideais, este número deverá estar mais próximo de 10 000.

Atentando ao resultado de temperatura na peça, foi possível constatar que o arrefecimento da peça é homogéneo. Tanto do lado da cavidade como do lado do macho, o gradiente térmico encontra-se abaixo dos 5°C para cada lado. Se toda a peça estiver à mesma temperatura e se o arrefecimento se der uniformemente em todo o volume, significa que a peça irá contrair à mesma taxa. Isto é um indicador de que a probabilidade de existirem empenos é menor, tal como irá ser abordado mais à frente no trabalho. Na análise da temperatura da peça verificou-se ainda que do lado do macho, a peça se encontra-se mais quente. A placa do macho é muito mais difícil de refrigerar uma vez que os canais de arrefecimento não podem passar junto à superfície do molde devido à presença dos sistemas de extração e movimentos. Verificou-se ainda que existe uma zona da peça onde se verifica uma concentração de calor. Para solucionar este problema poderia ser aplicada uma outra palheta, ou então, deslocar a que se encontra na figura 26, assinalada em baixo mais para a

esquerda. Para além disso, poderia ainda utilizar-se temperaturas do líquido refrigerador mais baixas para a placa do macho.

Utilizando os resultados de tempo até à temperatura de extração e da fração da camada solidificada, foi possível ver que a peça demora cerca de 10s até chegar à temperatura de extração, contando desde o momento que se começa a injetar.

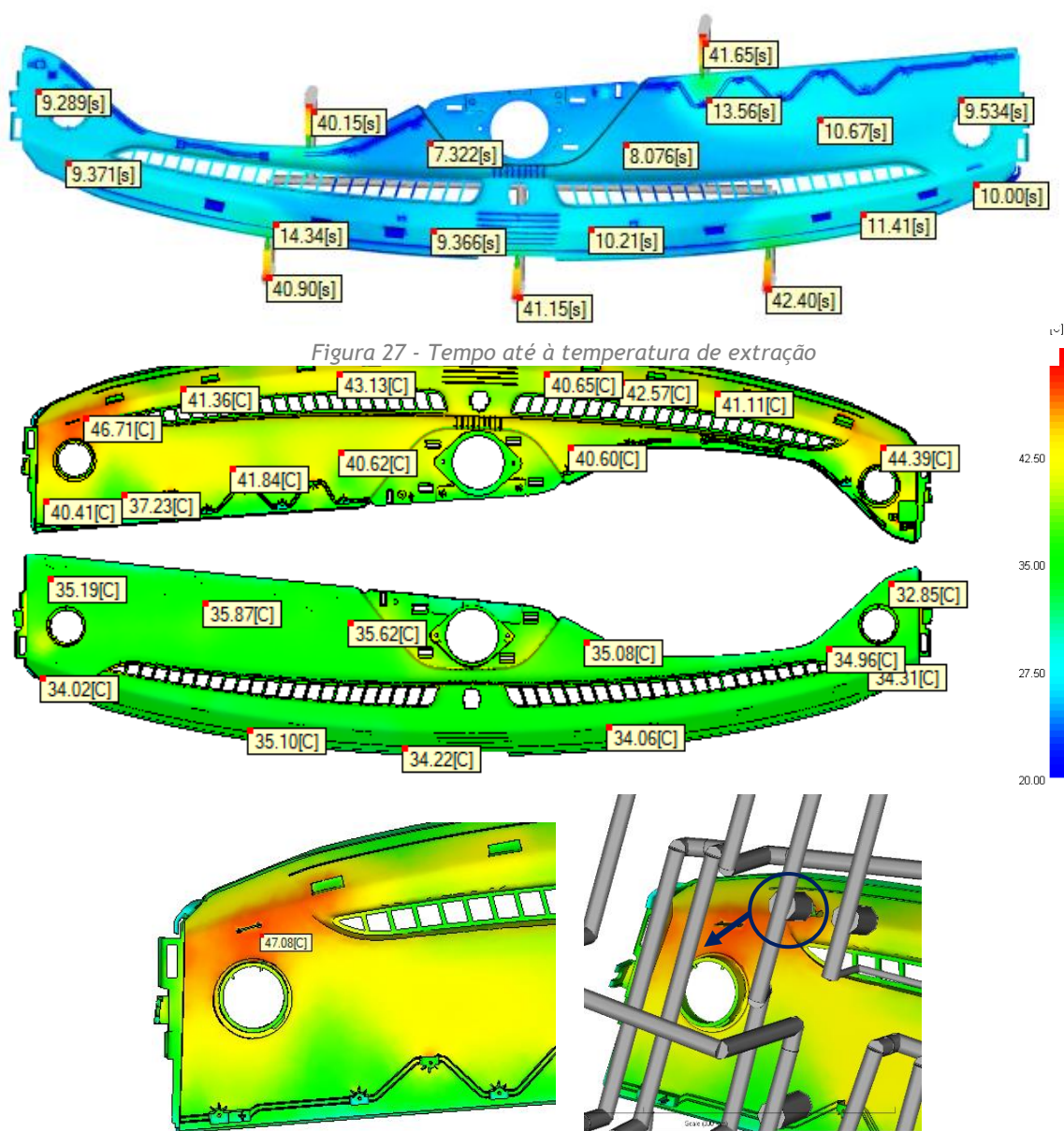


Figura 26 - Temperatura da peça no lado do macho e na cavidade e zona de concentração de calor

Contudo, este resultado não pode ser interpretado como se a peça estivesse pronta a ser extraída. Analisando o resultado da fração da camada solidificada, a zona perto dos ataques só aos 23 segundos é que se encontra abaixo da temperatura de transição vítrea. Neste resultado, a cor vermelha

representa 100% da espessura da peça solidificada. Caso a peça fosse extraída antes, os extratores e os movimentos poderiam causar grandes deformações na peça. Além disso, é preciso ter em conta que os ataques também têm que ser extraídos para que seja possível realizar a injeção seguinte. Estes só chegam à temperatura de extração aos 40 segundos.

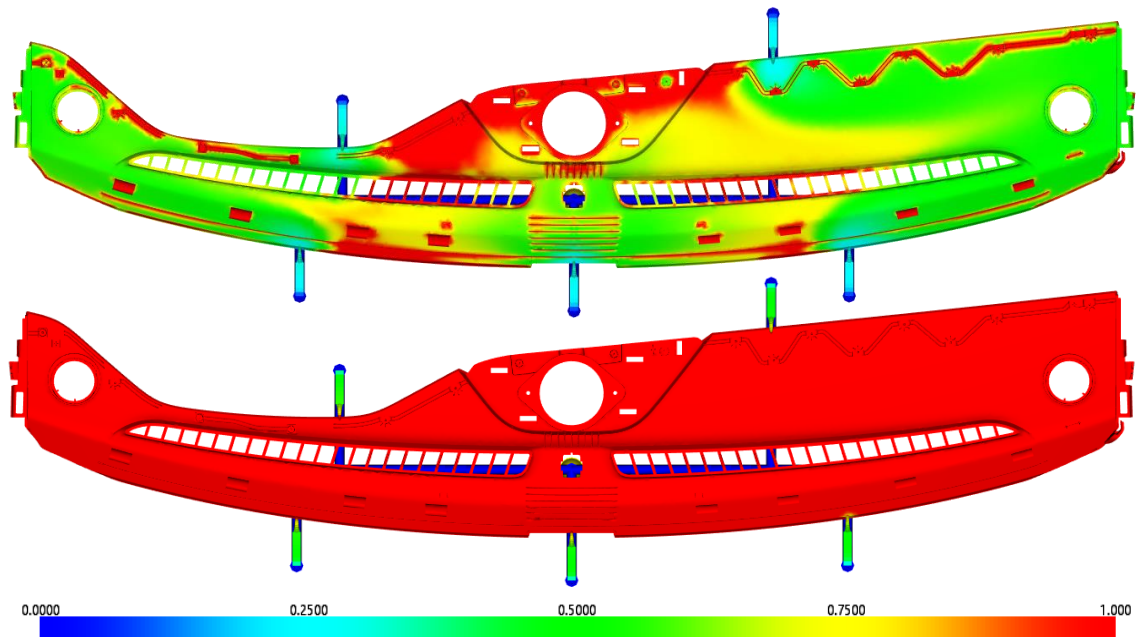


Figura 26 - Fração da camada solidificada ao 11 e aos 23 segundos

Por fim, realizou-se a análise de empeno e obtiveram-se os seguintes resultados.

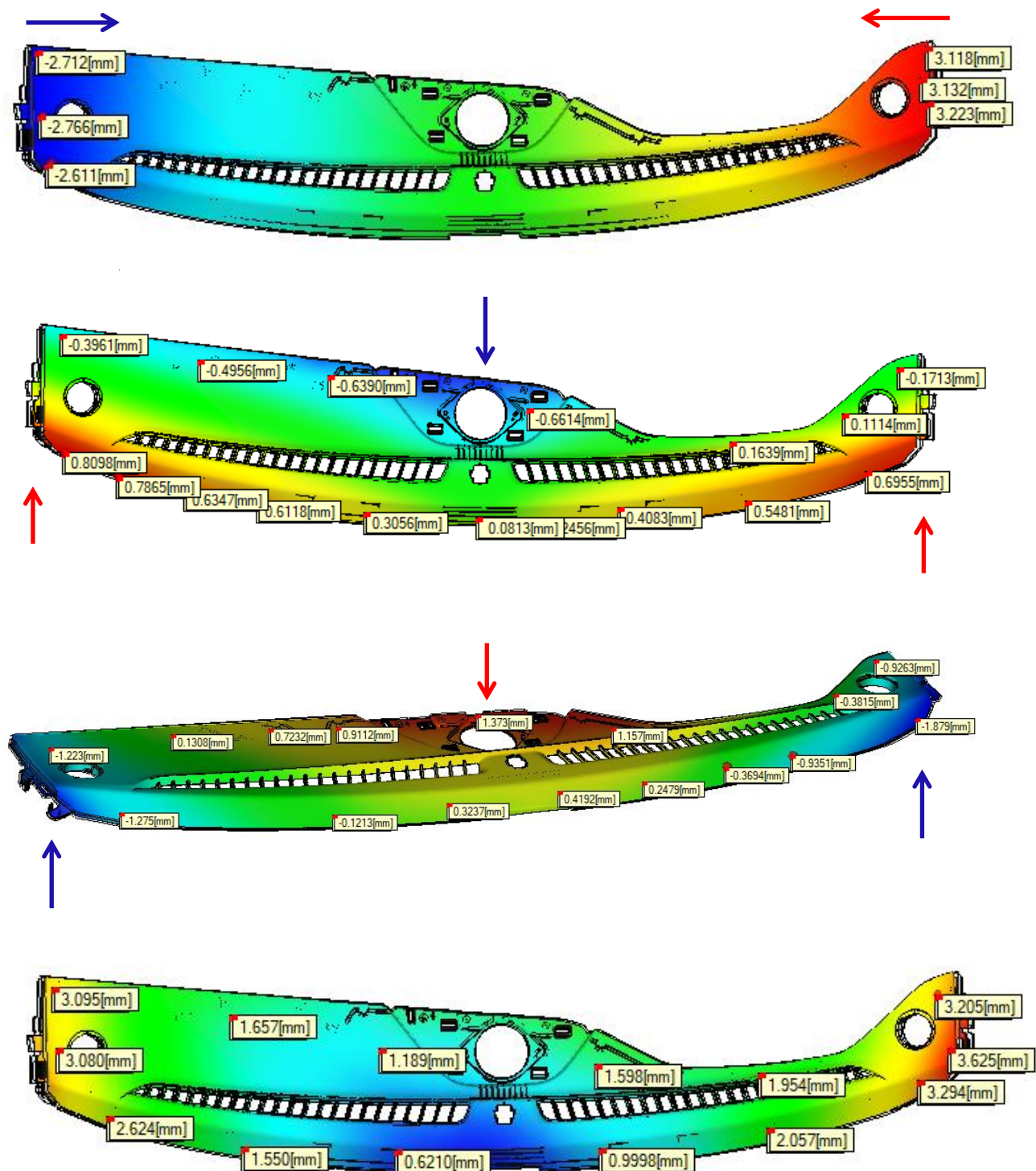


Figura 27 - Empeno nas direções X, Y e Z e empeno total com todas as causas de empeno

Analisando os diferentes resultados da análise de empeno foi possível isolar a causa principal para a deformação da peça. Grande parte do empeno deve-se a diferenciais de contração. Tal como se pode ver na Figura 28, a diferença entre o empeno por diferencial de contração e os resultados de empeno por todas as causas assumem valores muito idênticos. Segundo esta análise, as outras causas de empeno como diferenciais de arrefecimento, orientação e efeito de canto praticamente não têm influência no empeno da peça. Isto sugere que a etapa de compactação deve ser otimizada e que existem zonas da peça mal compactadas. Outra forma de reduzir o empeno por diferenciais de contração é alterar a geometria da peça reduzindo a espessura localmente.

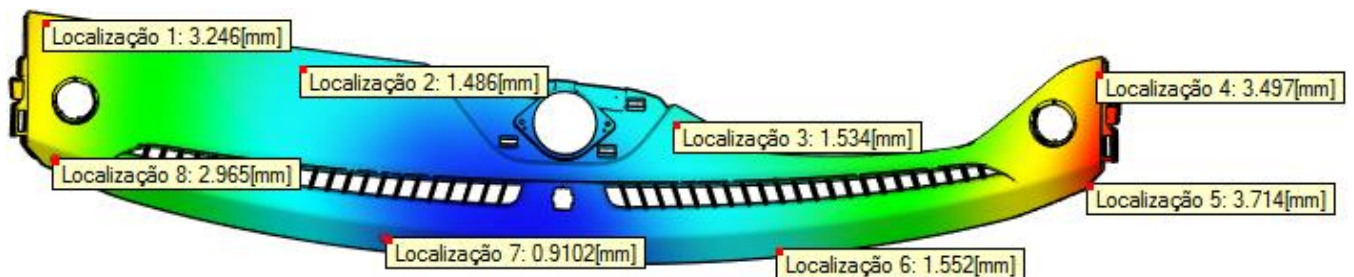


Figura 28 - Empeno total por diferenciais de contração

5.2 ANÁLISE DE MOLDES COM PROBLEMAS DE INJEÇÃO

Foi feita uma análise de diagnóstico a moldes problemáticos da PRIFER, no sentido de reproduzir os problemas pelos quais estes moldes demoraram a ser aprovados e rastrear a origem dos mesmos.

Os casos analisados foram identificados por possuírem um número de ensaios muito acima do número médio de ensaios necessários para um molde. O facto de um molde possuir um elevado número de ensaios significa que exigiu um grande número de alterações e medidas corretivas para que fosse aceite pelo cliente. Cada modificação implica atrasos e custos elevados.

5.2.1 MOLDE 1

Este molde é um molde de duas cavidades (injeta duas peças a cada ciclo) produzindo peças para um automóvel denominadas de pilar B inferior.

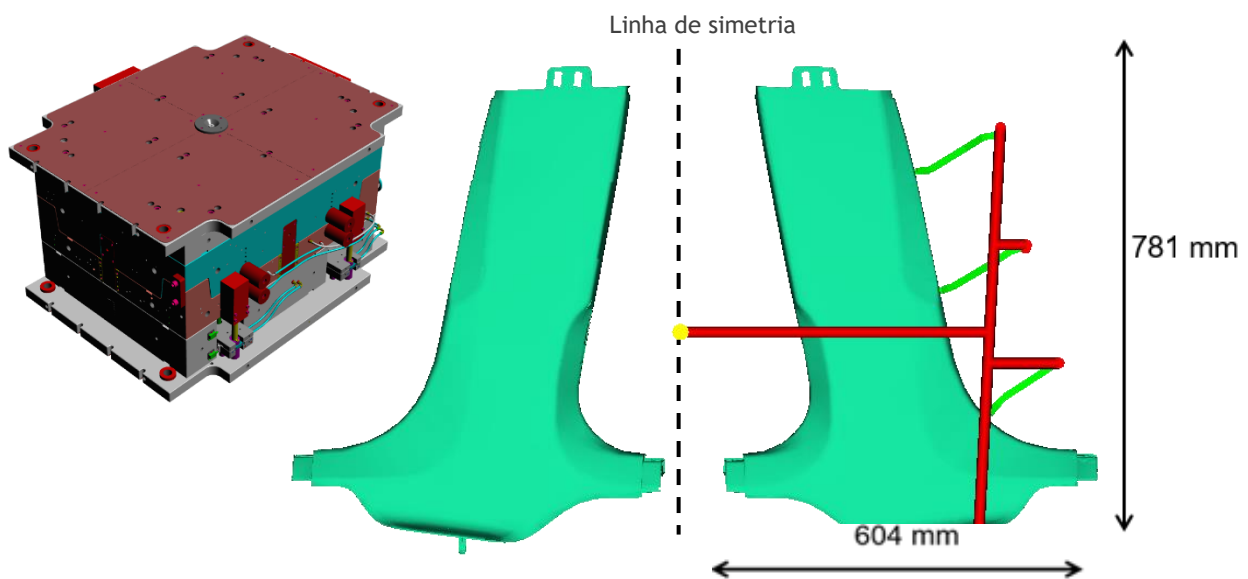


Figura 29 - - Modelo 3D do molde e esquema do sistema de injeção utilizado

Este molde foi orçamentado e concebido em função da geometria da peça e do estudo de injeção que foi fornecido pelo cliente. Nos relatórios de fecho deste molde constam 19 ensaios. Logo nos primeiros ensaios este molde evidenciou problemas. Eram necessárias pressões muito elevadas e era bastante difícil obter peças visualmente aceitáveis, sendo que as peças saíam do molde com demasiada rebarba e marcas de degradação de material. De modo a entender se o problema tinha origem na injeção, foi efetuado um novo estudo de Moldflow interno na PRIFER. Este novo estudo revelou que o sistema de

injeção proposto pelo cliente era desadequado para o molde em questão. Teoricamente, este molde tinha sido concebido para ser utilizado numa máquina de 1600T, tal como indicado no estudo do cliente (Figura 30). Contudo, após o estudo de injeção interno constatou-se que para este sistema de injeção seria necessária uma força de fecho mínima de cerca de 2600T. Este resultado demonstra que o dimensionamento do sistema de injeção partiu de pressupostos errados.

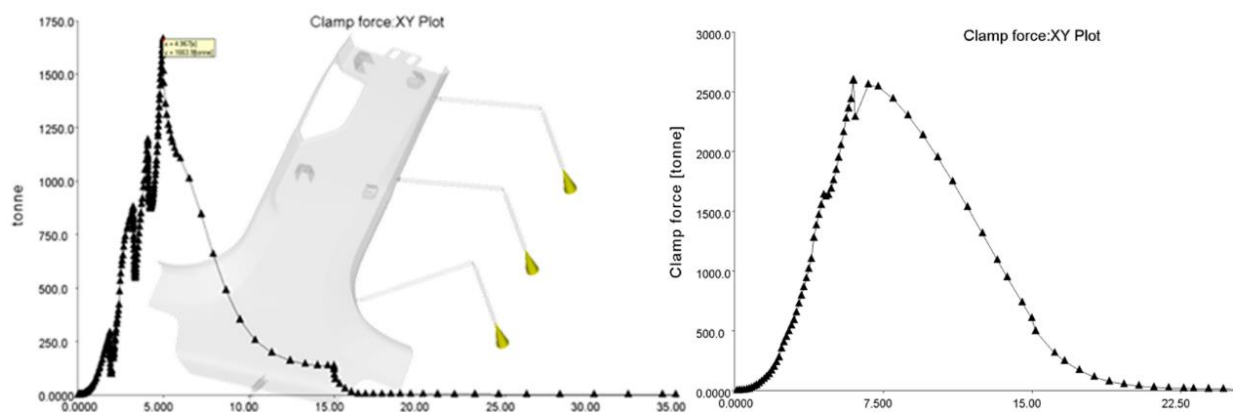


Figura 30 -Força de Fecho estimada no estudo do cliente e no ensaio interno da PRIFER

Fazendo uma análise aos estudos de MoldFlow internos da PRIFER, foi possível ver que existe uma série de fatores que explicam a necessidade de utilizar pressões muito elevadas para que a peça fosse cheia completamente.

Em primeiro lugar, o número e a localização dos ataques à peça originam um enchimento heterogéneo o que provoca compactações não uniformes resultando em empenos derivados de diferenciais de contração.

Além disso, tal como é possível ver na Figura 31, a taxa de corte no primeiro ataque à peça mostra valores demasiado elevados, acima de 400 000 (1/s). Tendo em conta que o material da peça é ABS, um termoplástico de alta viscosidade e de alta suscetibilidade térmica, que possui uma taxa de corte máxima de 50000 (1/s), podemos aferir que este ataque se encontra demasiado estrangulado. As condições de processamento deste material encontram-se em anexo.

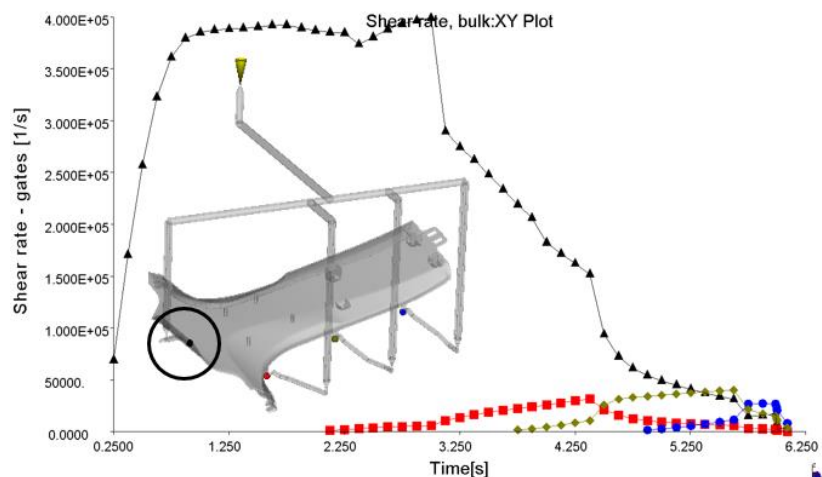


Figura 31 - Taxa de corte nos vários pontos de injeção antes de alterações

Através do resultado da temperatura de volume, presente na figura 32 podemos ainda ver que este estrangulamento provoca um sobreaquecimento do material, isto é, o material aumenta de temperatura dentro do molde. A temperatura de injeção é de 270°C, no entanto podemos ver que o material encontra-se a uma temperatura superior a 290°C em algumas zonas da peça durante o enchimento o que é altamente indesejável pois este material tem uma temperatura máxima de processamento de 280°C. Acima desta temperatura existe degradação das propriedades do material.

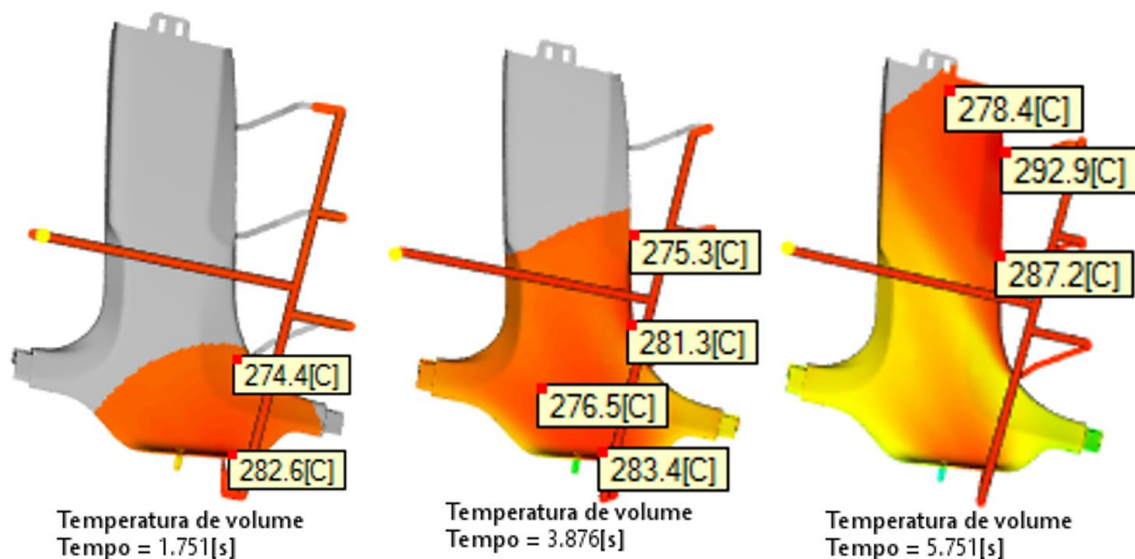


Figura 32 - Resultados da Temperatura de volume ao longo do enchimento antes de alterações

Outro fator chave para as elevadas pressões utilizadas é a distância que vai desde o bico de injeção até à peça. O facto de a peça distar 160 mm do bico de injeção faz com que seja necessário aplicar grandes pressões para que o

material passe o gito e preencha a cavidade moldante. Na figura 33 é possível ver a pressão em diversos pontos da cavidade.

Através desta análise é possível perceber que as pressões utilizadas durante a injeção forçam a abertura do molde no enchimento originando a formação de rebarba.

No sentido de tornar o molde viável e diminuir as pressões necessárias para a injeção, várias medidas podem ser tomadas, nomeadamente:

1. Aumentar a dimensão dos ataques;
2. Aumentar o número de pontos de injeção;
3. Diminuir a distância entre bicos de injeção e peça
4. Alterar o material
5. Aumentar a temperatura de injeção
6. Aumentar a temperatura do molde

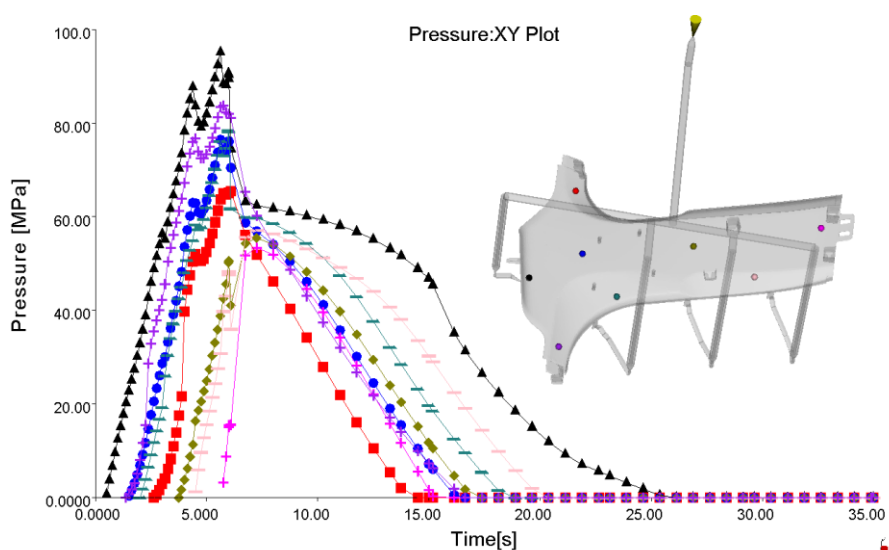


Figura 33 - Pressão em diversos pontos da cavidade do molde antes de alterações

Dado que este molde já estava produzido, as opções a tomar encontravam-se limitadas. Alterar o material não era uma opção para o cliente e diminuir a distância dos bicos de injeção à peça implicava novo molde.

Optou-se por alterar a geometria dos ataques para lâminas (figura 34) ao invés de ataques submarinos. Este tipo de ataques possui uma secção maior e oferece menos resistência à passagem do fundido, permitindo diminuir a taxa de corte. Pela mesma razão, adicionou-se um ataque na zona inferior da peça, que facilita o enchimento e permite compactar melhor essa zona.

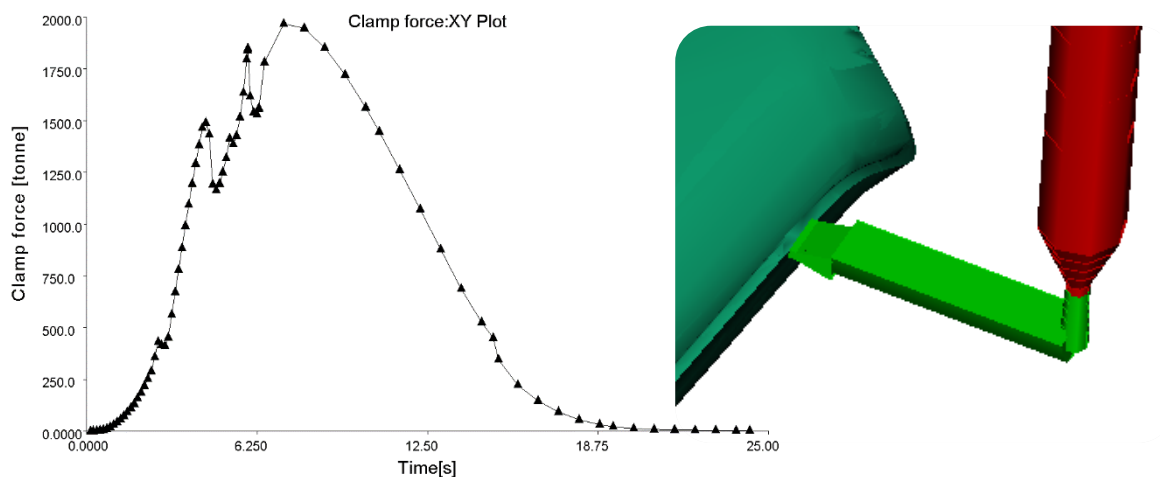


Figura 34 - Força de fecho e ataque em lâmina após modificação

Estas modificações permitiram melhorar o desempenho do molde sendo possível baixar a força de fecho em quase 700Ton e a taxa de corte que baixou acentuadamente (figura 35).

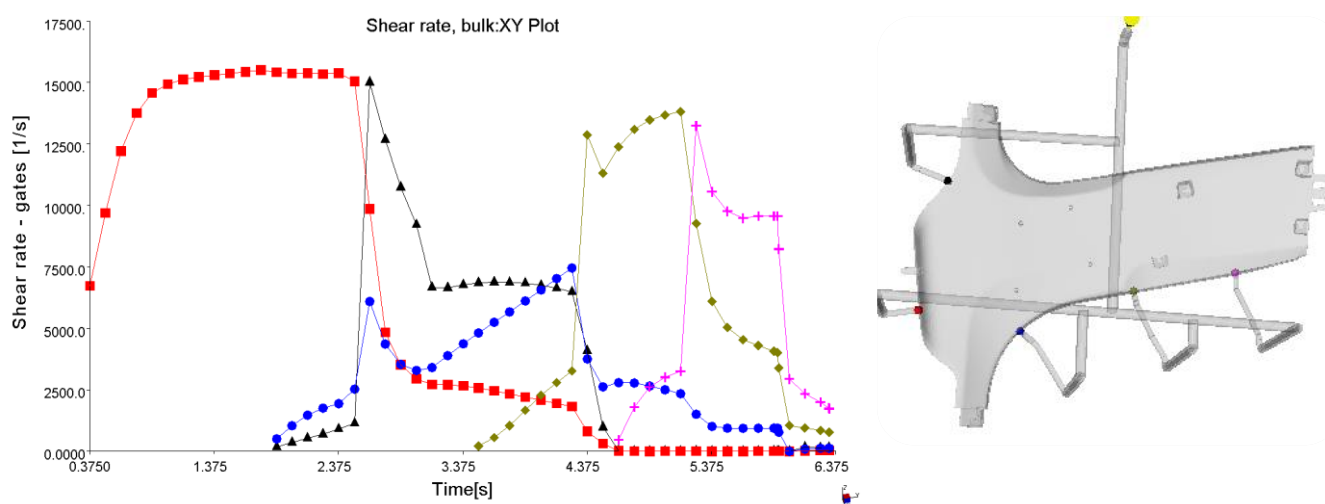


Figura 35 - Taxa de corte nos pontos de injeção após as modificações nos ataques

A partir deste caso foi possível constatar que a fase de projeto de um molde é de extrema importância e responsabilidade. Por vezes é muito difícil salvar um molde que está mal idealizado desde início em que todas as modificações estão condicionadas pelos sistemas que já estão presentes como o sistema de extração, os canais de arrefecimento e movimentos.

A própria posição dos bicos de injeção pode dificultar a colocação de um novo bico pois pode não existir um lugar apropriado para a injeção.

5.2.2 MOLDE 2

À semelhança do molde 1, o molde 2 é um molde de dupla cavidade com sistema de canais quentes, no entanto este molde possui injeção do lado do macho. O molde 2 foi sujeito a 19 ensaios. Este molde produz grelhas para o sistema de som de um automóvel, que é um tipo de peça particularmente difícil de injetar devido às espessuras muito finas que criam grande obstrução ao fluxo de material. Além disso, o material escolhido para a injeção deste componente é um PC + ABS, um material de grande viscosidade.

O sistema de injeção foi definido tal como a imagem que se encontra em baixo, sendo que a posição dos pontos de injeção foi definida pelo cliente.

Nos primeiros ensaios deste molde registaram-se grandes dificuldades não

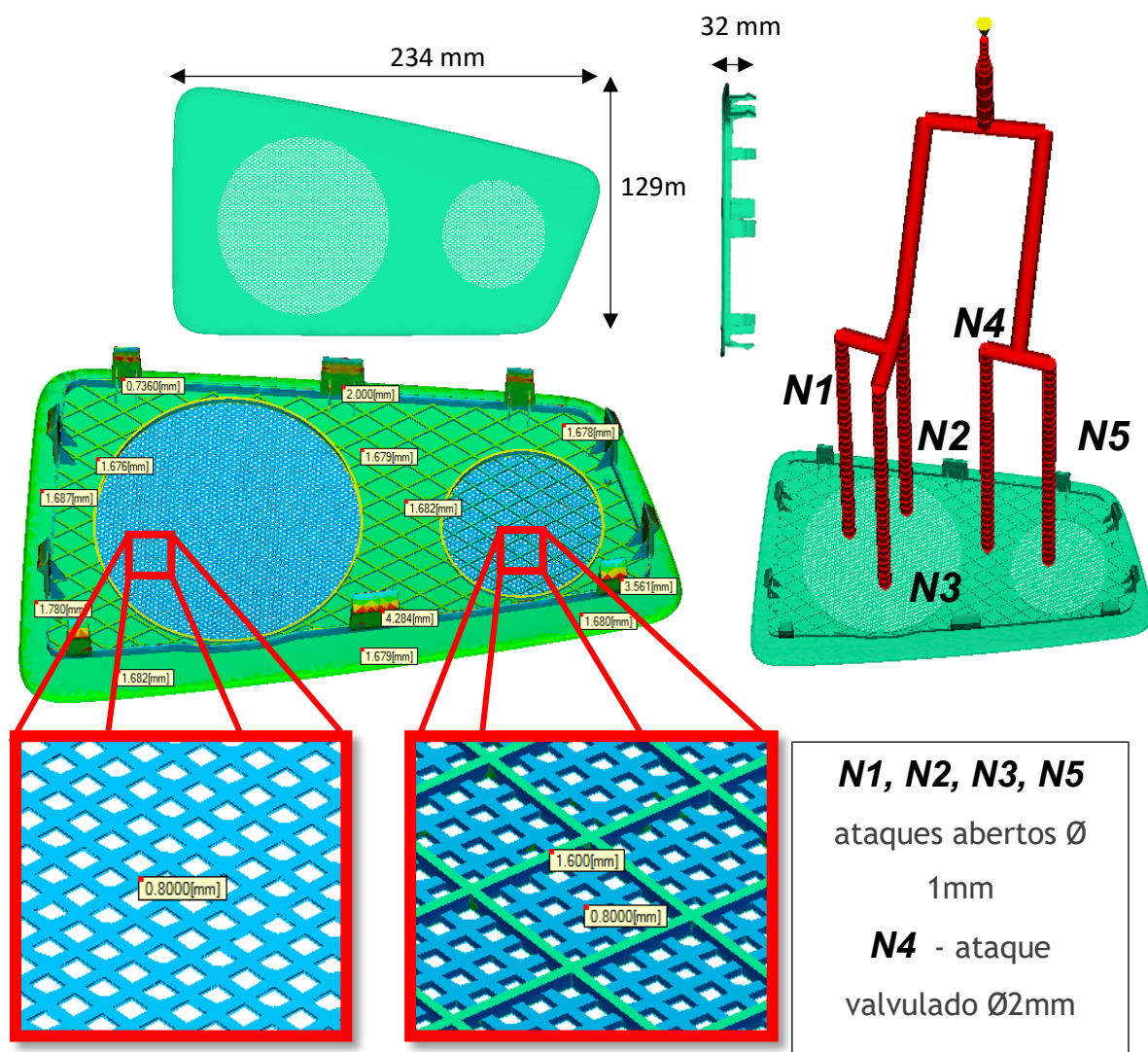


Figura 36 - Dimensões da peça e estratégia de injeção só a injetar a peça totalmente, mas também na sua extração.

Através dos estudos de injeção efetuados internamente na PRIFER, foi possível ver que os diversos problemas presentes neste molde e as dificuldades registadas durante os ensaios surgem da combinação de dois fatores; uma injeção mal idealizada e uma má definição de peça.

Como se pode ver na imagem que se segue, o fluxo de material “congela” nas grelhas (espessura de 0.8 mm) dado que perde toda a sua mobilidade com o arrefecimento mais rápido. Como o material segue sempre o caminho que oferece menor resistência à passagem do fluxo, a zona da grelha, enche com grande dificuldade e não permite o enchimento da peça à volta da grelha (figura 37).

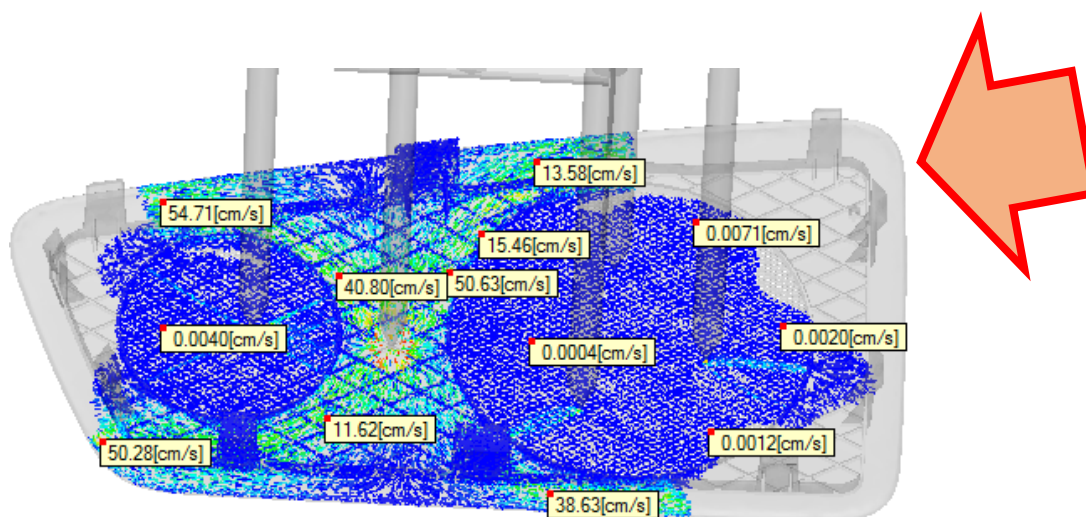


Figura 37 - Vetores velocidade de fluxo durante o enchimento no instante 1s

A espessura reduzida, a baixa fluidez do material e a localização dos ataques fazem com que seja necessário utilizar pressões muito elevadas (155Mpa por cavidade) para que se dê a moldação completa.

Os três ataques no centro da grelha (N1, N2 e N3) são bicos de injeção diretos, não valvulados. Logo à partida é possível ver que na zona entre e à volta de N1, N2 e N3 irão existir sobrecompactações, tensões internas e prisões de ar que poderão queimar o material. Na imagem 38 é possível ver a queda de pressão ao longo da peça. É possível ver que a esta é muito elevada nos instantes iniciais e que no fim do arrefecimento ainda se notam marcas de tensão residual. Estas marcas evidenciam zonas sobrecompactadas onde muito provavelmente irão existir tensões internas no material.

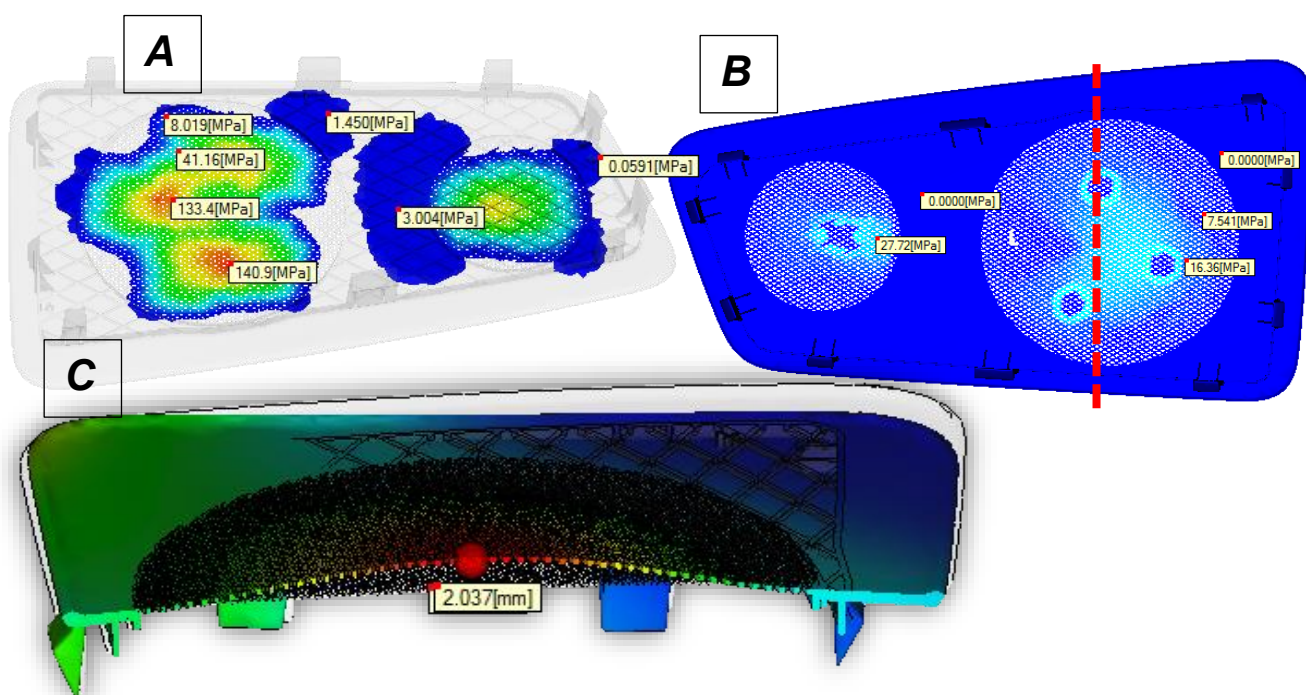


Figura 38 - A) Pressão na cavidade moldante aos 0.7s ; B) Pressão na cavidade aos 26s; C) Vista em corte da zona da grelha maior e respetivo empeno

Este tipo de tensões internas, aliadas às diferenças de espessura ao longo da peça (zona da grelha e zona exterior) originam diferenciais de contração que resultam em empenos. Com os empenos, o atrito entre a peça e o molde torna-se maior, pelo que a peça ganha a chamada “prisão” ao molde tornando-se muito difícil desmoldar. Para além dos empenos provocados pelo sistema de injeção, ainda podem ocorrer empenos durante a extração. Devido ao efeito de “prisão”. Devido ao atrito entre a peça e o molde, o sistema de extração tem que exercer uma força maior para ejetar a peça e, dado que esta ainda se encontra quente na fase de extração, os extratores podem facilmente “empenar” ou até mesmo furar a peça, agravando o problema. Na imagem em

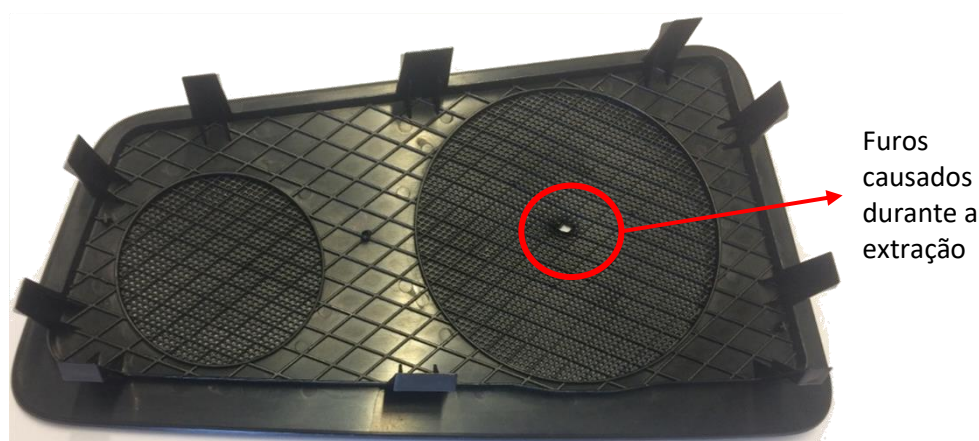


Figura 39 - Fotografia da peça antes de serem efetuadas alterações ao molde

baixo é possível ver o problema em questão, numa peça injetada antes de todas as alterações do molde estarem acabadas e onde se verifica este problema.

Outro fator que pode afetar o desempenho deste molde é o facto de o volume do sistema de injeção ser quase 3 vezes superior ao volume da peça (figura 40). Isto significa que o material que entra no sistema de injeção só ao fim de três ciclos é que chega à peça. O tempo exagerado de residência do material no sistema de injeção poderá provocar a degradação do material e a perda de propriedades, o que tem um efeito ainda mais acentuado para materiais muito sensíveis à temperatura como o material em questão.

Total volume	=	157.5558 cm³
Volume of tetrahedral elements	=	42.6991 cm³
Volume of sprue/runner/qate elements	=	114.8567 cm³

Figura 40 - Volume da peça vs Volume do sistema de alimentação

No sentido de resolver as dificuldades de enchimento e salvar o molde, optou-se por fazer alterações à geometria da peça. De notar que estas peças são sujeitas a testes acústicos e são desenhadas para que a sonoridade seja o melhor possível pelo que qualquer alteração na geometria da peça pode comprometer a sua função. A zona das grelhas é por este motivo uma área completamente interdita a modificações.

Tendo isto em conta, foram aplicados canais preferenciais ao redor das grelhas, tal como a imagem que se encontra em baixo. Estes são basicamente um aumento de espessura localizado que permite guiar o fluxo de material para a zonas mais problemática e de maior dificuldade de enchimento.

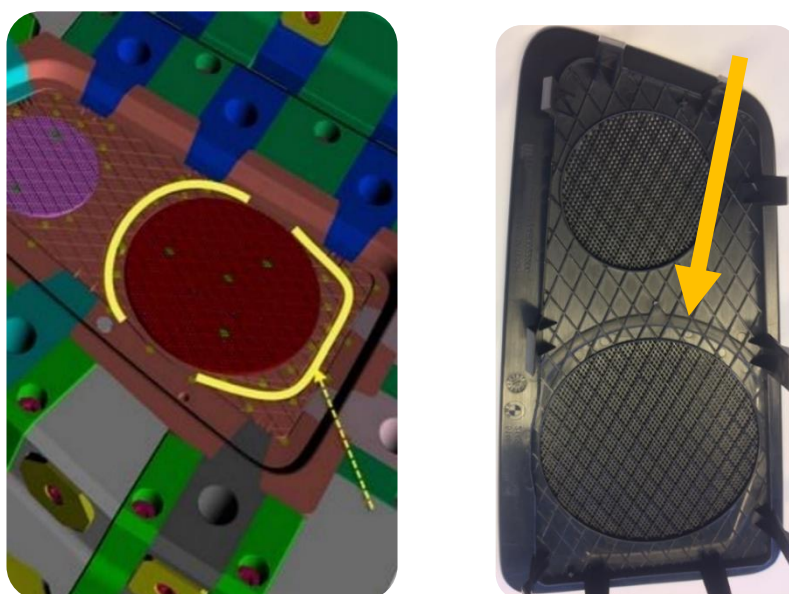


Figura 41 - Esquema das alterações no molde realizadas para facilitar o fluxo e fotografia da peça após abertura dos caminhos de fluxo

Estas medidas permitiram solucionar o problema e no fim obtiveram-se peças sem empenos e com excelente qualidade e acabamento superficial.

Neste caso, teria sido pertinente a realização de uma análise de arrefecimento e de empeno logo na fase inicial para alertar a equipa de projeto sobre os empenos e sobre alguns dos problemas que se verificaram já durante os ensaios de molde.

Os casos dos moldes 1 e 2 ilustram de uma forma clara a importância que poderá ter para a PRIFER a realização de uma verificação dos dados recebidos por empresas externas. Esta confirmação poderia ter evitado reparações, poupado tempo e recursos.

Um estudo interno poderia ter previsto todos estes problemas na fase inicial de projeto onde qualquer alteração não representa custos de montante elevado. Poderiam ter sido feitas propostas de alteração ao sistema de injeção de forma a melhorar o enchimento e minimizar os defeitos. O cliente iria apreciar e beneficiar com este tipo de alertas e isto permitiria reforçar a marca de qualidade da PRIFER.

5.3 VIABILIDADE ECONÓMICA

No sentido de estudar a viabilidade económica da implementação de estudos de enchimento e de refrigeração numa fase preliminar do projeto e com isto verificar a fiabilidade da informação recebida pelo cliente, (estudos de Moldflow externos e falhas na definição da peça e na definição do sistema de injeção), foi feita uma análise financeira aos custos associados à utilização do software para este mesmo fim.

Esta análise procurou confrontar os benefícios e os custos de estudos no início do projeto, com os custos da repetição de ensaios de moldes.

Apenas os custos relativos ao ensaio irão ser contabilizados, os custos das modificações, dificilmente podem ser quantificados pois dependem da alteração em si.

5.3.1.1 Custos de estudos de Moldflow - Pressupostos

- **Licença:** considerou-se que o tempo de vida da licença de Autodesk Moldflow Insight é de 5 anos (tempo até ficar obsoleto). Considerou-se um custo de manutenção de 2000€ por ano.
- **Colaboradores:** assumiu-se que é necessário um único trabalhador. O custo dos encargos reflete a contribuição para a segurança social e seguro AT. Não reflete outro tipo de encargos. Contempla 8 horas de trabalho por dia, 21 dias por mês, 14 meses/ano.
- **Equipamento:** Este valor contempla o tempo de vida útil de um computador até que este fique obsoleto.
- **Eletricidade:** este custo tem a ver com os custos mensais da EDP com o funcionamento do computador. Dado que não existe nenhum contador específico para a computador, trata-se de uma estimativa a partir da fatura total da eletricidade da empresa.
- **Instalações:** este valor contempla a despesa inerente a uma renda mensal de um gabinete de escritório, ou seja, a quota parte de todos os de edifícios, escritórios e restantes instalações.
- **Comunicações:** considerou-se que a fatura mensal de Internet e telefones da PRINEMO assumia este valor.

- **Mobiliário de escritório:** considerou-se este valor como sendo o custo necessário ao funcionamento da PRINEMO contemplando todos os custos em material de escritório.
- **Tempo médio duração de cada estudo:** considerou-se que um estudo de Moldflow completo tem uma duração média de 24h (enchimento + compactação + arrefecimento + empeno).

Tabela 4 - Custos de estudos de Moldflow

Custos	AQUISIÇÃO	TEMPO DE VIDA (ANOS)	HORA	MÊS	ANO
Licença	97 000,00 €	5	10,14 €	1 763,64 €	19 400,00 €
Manutenção			1,04 €	181,82 €	2 000,00 €
Operador			13,17 €	1 800,00 €	25 200,00 €
Encargos			3,03 €	414,00 €	5 796,00 €
Seguro AT			0,26 €	36,00 €	504,00 €
Equipamento	5 000,00 €	5	0,52 €	90,91 €	1 000,00 €
Eletricidade			0,31 €	50,00 €	600,00 €
Instalações			12,54 €	2 000,00 €	24 000,00 €
Comunicações			0,63 €	100,00 €	1 200,00 €
Mobiliário de escritório	3 000,00 €	5	0,31 €	54,55 €	600,00 €
TOTAL			41,95 €	6 490,91 €	80 300,00 €
Tempo médio estudo de Moldflow			24	0,2	0,01
Custo médio estudo			1 006,90 €	973,64 €	1 095,00 €

5.3.1.2 Custos de ensaios - Pressupostos

- **Máquina de injeção**

Considerou-se um custo/hora para um ensaio de uma máquina de 1600T de 180€. Não foram considerados custos de manutenção da mesma.

- **Colaboradores**

Considerou-se que para cada ensaio seriam precisas pelo menos quatro pessoas envolvidas (operador de máquina de injeção + técnico de injeção + gestor de projeto + serralheiro de bancada). O custo dos encargos reflete a seg. social, não reflete seguro AT e outros encargos. Contempla 8 horas de trabalho por dia, 21 dias por mês, 14 meses/ano.

Considerou-se que o técnico de injeção tem uma participação em apenas 50% no ensaio.

- **Consumíveis e acessórios de Injeção**

Considerou-se que o custo de todo o equipamento necessário para o funcionamento do ensaio assumia este valor. Este custo engloba os custos de ferramentas, computadores e todos os consumíveis necessários como caixas de plástico e cartão e todos os acessórios essenciais para a realização do ensaio.

- **Eletricidade**

Este custo tem a ver com os custos mensais da EDP com o funcionamento da máquina de injeção. Dado que não existe nenhum contador específico para a máquina de injeção, trata-se de uma estimativa a partir da fatura total da eletricidade da empresa.

- **Instalações**

Este valor contempla a quota parte do setor de injeção da PRIFER relativamente a todos os custos de edifício, armazéns, escritórios, instalações fabris e restantes instalações. Considerou-se que esta despesa tem um custo de 3000€ por ano.

- **Estrutura (não produtiva)**

Considerou-se este valor como sendo o custo necessário ao funcionamento do setor de injeção contemplando todos os serviços necessários para o funcionamento do mesmo, nomeadamente: administração; serviços administrativos; serviços de engenharia; segurança; manutenção; limpeza;

- **Tempo médio duração de cada ensaio**

Considerou-se que cada ensaio tem uma duração média de 8h.

Tabela 5 - Custos de ensaios de molde

Custos	HORA	MÊS	ANO
Máquina de injeção	180,00 €	28 800,00 €	345 600 €
Operador Máquina	7,31 €	1 000 €	14 000 €
Encargos	1,68 €	230 €	3 220 €
Técnico de Injeção (50%)	2,19 €	300 €	4 200 €
Encargos	0,50 €	69 €	966,00 €
Gestor Projeto	8,78 €	1 200 €	16 800 €
Encargos	2,02 €	276 €	3 864 €
Serralheiro Bancada	7,31 €	1 000 €	14 000 €
Encargos	1,68 €	230 €	3 220 €
Consumíveis e Acessórios de injeção	20,90 €	3 636 €	40 000 €
Eletricidade	4,60 €	800 €	9 600 €
Instalações	18,81 €	3 000 €	36 000 €
Estrutura (não produtiva)	9,40 €	1 500 €	18 000 €
TOTAL	265,20 €	42 041,36 €	509 470,00 €
Tempo médio duração de cada ensaio	8	0,0	0,00
Custo médio ensaio	2 121,59 €	2 001,97 €	2 021,71 €

5.3.2 CONSTATAÇÕES

Com esta análise, foi possível ver que o custo de um estudo de Moldflow é significativamente mais baixo que o custo de um ensaio de molde. O primeiro ronda os 1000€, enquanto que o segundo é duas vezes mais caro (2100€). Tendo em conta que o número médio de ensaios de um molde da PRIFER é de 5 ensaios, podemos ver que a PRIFER gasta em média cerca de 10 608€ em ensaios até que se dê a aprovação do molde.

Com base nestes valores, é possível concluir que caso o estudo de Moldflow permita reduzir o numero de ensaios em apenas um ensaio, é possível realizar

uma poupança de cerca de 1100€ e que se um estudo de Moldflow permitir reduzir a duração de um ensaio em apenas 4 horas, a sua utilização já se justifica, tendo em conta que o custo por hora do ensaio é de 265,20€.

De forma a sustentar esta informação, é necessário provar que quando o estudo de Moldflow é feito corretamente o nº de ensaios diminui bem como a duração de cada ensaio.

Para isso, foi feito um levantamento estatístico sobre o nº de moldes adjudicados à Prifer no ano de 2016 e sobre o respetivo número de ensaios. Sabendo que foram adjudicados 95 moldes no ano de 2016 e que o nº médio de ensaios necessários para a aprovação do molde é de 5 ensaios, foram estudados os casos cujo nº de ensaios era muito diferente da média e que tinham problemas relacionados com a injeção. Verificou-se que todos os moldes adjudicados à PRIFER já vêm com estudo de Moldflow feito externamente. Verifica-se também que do total de moldes, apenas 9 tiveram problemas de injeção e destes 9, apenas 3 indicavam erros no estudo de Moldflow enquanto que os problemas de injeção dos outros 6 são devido a fatores externos ao Moldflow tal como é possível ver pela tabela 6.

Tabela 6 Dados sobre moldes da PRIFER no ano de 2016

Nº moldes adjudicados à PRIFER	95
Nº médio de ensaios por molde	5
Percentagem de moldes com MoldFlow feito externamente à PRIFER	100%
Moldes identificados com problemas de injeção	9
Percentagem de moldes com problemas de injeção	9%

Fazendo uma análise focada a estes 9 moldes problemáticos referentes ao ano de 2016, foi possível distinguir as razões que levaram estes moldes a ter um número de ensaios tão diferente da média tal como se encontra representado na tabela 7.

Tabela 7 - Moldes identificados com problemas de injeção

Molde	Nº ensaios	Observações
1	19	Projeto do sistema de injeção mal definido devido a estudo de Moldflow mal feito
2	19	Problemas de definição de peça e Moldflow realizado com pressupostos errados
3	18	Projeto do sistema de injeção mal definido devido a estudo de Moldflow mal feito
4	10	Alteração do sistema de injeção numa fase intermédia da produção
5	9	Alteração do sistema de injeção numa fase intermédia da produção
6	8	Alteração do sistema de injeção numa fase intermédia da produção
7	10	Alteração do sistema de injeção numa fase intermédia da produção
8	7	Problemas de mudança de cor - Má definição do sistema de injeção
9	9	Problemas de mudança de cor - Má definição do sistema de injeção

Os moldes 4, 5, 6, e 7 não podem ser analisados porque os problemas destes moldes estão relacionados com alterações por parte do cliente numa fase intermédia da produção do molde.

Relativamente aos moldes 8 e 9, estes possuíam problemas de mudança de cor. Por vezes, moldes onde se pretende injetar várias cores diferentes são orçamentados de forma a que a mudança de cor ocorra ao fim de um determinado número de injeções. Um sistema de injeção de um molde pode ser otimizado para mudanças de cor e existem medidas que se devem tomar para isso como, utilizar canais de injeção com diâmetro menor, maiores pressões e homogeneização do volume a injetar por bico.

Contudo, não é possível garantir que a mudança de cor completa irá ocorrer ao fim de um determinado número de injeções a partir de um estudo de Moldflow. Existem outras questões inerentes à máquina de injeção e ao material que têm uma influência direta no tempo de limpeza do fuso e que não é possível ter em conta neste software.

Por essas razões, apenas os três primeiros casos podem ser alvo de estudo. É necessário ter em conta que a realização de estudos de Moldflow internos na PRIFER para efeitos de comparação/confirmação com estudos de clientes implica realizar um controlo a 100% de todos os projetos que entram na PRIFER. Considerando os 95 moldes produzidos no ano de 2016, podemos calcular que esta confirmação teria um custo de 95 646 € por ano.

Este cálculo tem em conta que é necessária a realização de um estudo completo em todos os projetos, o que nem sempre é verdade. Como é possível constatar 97% dos estudos fornecidos pelos clientes têm qualidade suficiente para que este estudo não seja necessário. Uma análise somente aos estudos recebidos com resultados duvidosos ou com falta de resultados permitiria baixar muitíssimo este custo e daria condições para fazer um relatório de alertas para potenciais problemas a clientes.

Sabendo isto, esta análise ganha grande relevância quando se entende que o montante dos prejuízos implicados nestes moldes (em 1, 2 e 3) se deve unicamente a moldes que entraram em produção com base em estudos de Moldflow errados ou mal definidos. Com base na análise de custos feita anteriormente, foi feito o cálculo do custo específico para o ensaio destes moldes. Analisando os casos que tiveram 19 ensaios até à sua aprovação, podemos calcular que estes tiveram um custo para a PRIFER de 40 086 € somente em ensaios. Mais 29 537 € que o normal.

Ainda que estes casos representem apenas 3% de todos os moldes expedidos pela PRIFER, podemos estimar que apenas para os moldes 1, 2 e 3 a PRIFER desembolsou 86 985 € a mais, exclusivamente em ensaios de molde extra graças a estudos de Moldflow que se encontravam mal feitos. Certamente que existem muitos outros custos associados a estes moldes que não estão a ser contabilizados como os custos em modificações, custos de transportes, os custos dos atrasos e das horas de mão de obra extra necessária, etc...

Ainda assim, estes valores já são suficientes para tirar a conclusão de que o custo de ensaios com estes três moldes defeituosos foi superior ao eventual custo de análise exaustiva a todos os moldes adjudicados.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Com o presente trabalho foi possível aprofundar conhecimentos sobre os principais problemas e desafios da injeção de peças plásticas.

Para o completo domínio deste tema é absolutamente fundamental possuir conhecimentos em três áreas distintas, mas que são completamente dependentes entre si.

Estas três áreas são o desenvolvimento de produto, a construção de moldes e por fim o processo de injeção. Nesta indústria, para fazer face aos problemas que surgem no dia a dia de uma forma competente, não basta possuir conhecimentos em apenas uma destas áreas. É o domínio destas três que conduz à obtenção de produtos de qualidade superior a menor custo. Durante a realização deste trabalho, foi possível aprofundar o conhecimento e obter competências essenciais nas três.

A primeira conclusão que este trabalho permitiu tirar é que a injeção de plástico é sempre um compromisso constante entre uma enormidade de fatores, estejam eles relacionados com as especificações do cliente, com a factibilidade da peça a produzir ou por questões do processamento do material, etc...

Existem muitas variáveis que precisam de estar devidamente ajustadas e existe uma forte dependência entre todas elas. A harmonização de todos estes fatores começa no departamento de projeto seja este da peça ou do molde e é imperativo que tudo funcione bem já desde esta fase.

A segunda conclusão é que o MoldFlow é uma ferramenta de grande utilidade para os projetistas de molde. Este software presta apoio durante o projeto da peça e do molde e é uma base para a definição do sistema de injeção. Além disso pode servir como ferramenta de diagnóstico para a origem de defeitos em peças plásticas moldadas por injeção, sejam eles provocados pela injeção ou pelo arrefecimento.

No presente trabalho foi feita a otimização de um projeto através de um estudo completo de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno e seguidamente foram estudados moldes feitos pela PRIFER com problemas relacionados com a injeção onde foi possível rastrear a causa dos problemas.

Nestes moldes verificaram-se problemas relacionados com o projeto do sistema de injeção e até mesmo com a própria geometria da peça. A deteção prévia das dificuldades de enchimento e da probabilidade de existirem defeitos poderia ter evitado a repetição de ensaios e conduzir a moldes mais baratos e funcionais em menos tempo, o que se traduz no fim num maior lucro.

Este trabalho permitiu também adquirir alguns conceitos básicos sobre desenvolvimento do produto e foi possível ver que para a injeção de um determinado componente tenha sucesso, é necessário que o design de peça seja feito tendo em conta o processo produtivo, além da estética e da função que este desempenha. Existem regras de design que devem ser respeitadas para que o produto seja factível.

Todos os moldes produzidos na PRIFER têm um estudo de Moldflow que é sempre feito externamente à PRIFER. Como existem recursos dentro do grupo para que isto não aconteça, foi feita uma análise sobre a hipótese de se realizarem estes mesmos estudos na PRINEMO. Para saber se esta análise se justifica, primeiramente foi feito um levantamento estatístico relativo a 2016 sobre o nº de ensaios de cada molde de forma a identificar moldes com problemas de injeção e foi possível ver que só 9% dos moldes produzidos pela PRIFER possuem problemas de injeção e desses, só 3% tem origem em estudos de Moldflow mal realizados. Isto prova que só 3% dos estudos feitos externamente não têm qualidade suficiente para cumprir com o objetivo. Embora não tenha sido possível provar que para o caso específico da PRIFER a realização destes estudos internamente pode não se justificar, outras ilações foram tiradas através de uma análise financeira feita posteriormente. Foi feito um confronto entre os custos de um estudo de Moldflow feito internamente na PRINEMO para projetos da PRIFER e os custos associados à repetição de ensaios na PRIFER. Provou-se que só nestes 3% de moldes com Moldflow mal realizado, a PRIFER teve um custo em ensaios superior ao eventual custo de análise exaustiva a todos os moldes adjudicados à PRIFER no ano de 2016. Por vezes, poderá ficar mais caro reparar algo que está mal idealizado desde o início do que fazer um molde novo. Com isto, foi possível provar que estes estudos de injeção envolvem uma grande responsabilidade, uma vez que são a base para a definição do sistema de injeção o que por sinal tem influencia direta na

qualidade da peça produzida. Quando um estudo de Moldflow é mal feito ou parte de pressupostos errados, os seus resultados perdem toda a sua relevância e podem induzir em erro quem os interpreta e quem é responsável por projetar e produzir o molde. Podem levar a moldes mal feitos, que por sua vez originam produtos de fraca qualidade, podendo manchar a reputação do construtor de molde, para não falar nos prejuízos que acarretam.

Pode ainda equacionar-se a hipótese de adquirir um outro software mais barato, com uma análise mais rápida e igualmente capaz de forma a tornar esta verificação mais competitiva.

7. PROPOSTA E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

Todos os estudos de Moldflow que chegam à PRIFER vêm com a sequência de injeção definida por tempo de injeção. Isto acontece de uma maneira geral para todos os estudos que são feitos externamente à PRIFER, sendo que quem os faz, não possui conhecimento da máquina de injeção que irá ser utilizada.

Durante o ensaio assistido na PRIFER, foi possível constatar que estes mesmos estudos não têm utilidade para os técnicos de injeção, a não ser para saber a sequência de abertura. A programação da abertura dos bicos na máquina é sempre feita por posição relativa do fuso, o que faz com que estes estudos percam grande parte da sua relevância.

Como na máquina de injeção não é possível programar o valvulamento por tempo, os operadores utilizam um processo iterativo de tentativa e erro aliado à sua grande experiência para encontrarem as condições ideais de processamento. Isto pode fazer com que os ensaios demorem mais tempo, desperdicem mais material e, por isso, tenham maiores custos associados.

Verificou-se também que existe alguma desconfiança nos estudos de Moldflow por parte dos operadores de máquinas de injeção, talvez por más experiências que tenham tido, por desconhecimento das capacidades do programa ou porque simplesmente possuem grande experiência e, por isso, não necessitam do estudo para definir as condições de processamento.

Na injeção de plásticos existem muitas variáveis e fatores como, por exemplo, tipo de fuso, o diâmetro do fuso, o seu comprimento, entre outros que não são contabilizados numa simulação e por vezes têm grande preponderância no resultado final. O Moldflow é uma ferramenta que permite fazer estudos injeção tendo em conta a máquina, sendo possível programar a abertura de válvulas por posição do fuso.

Na impossibilidade de confirmar no presente trabalho se esta alteração poderia tornar o processo de ensaios menos iterativo, pretende-se dar seguimento a esta análise, acompanhando projetos de raiz até aos primeiros ensaios sabendo que isto só faz sentido caso se saiba a máquina destino e que só permite poupar custos relativos ao primeiro ensaio.

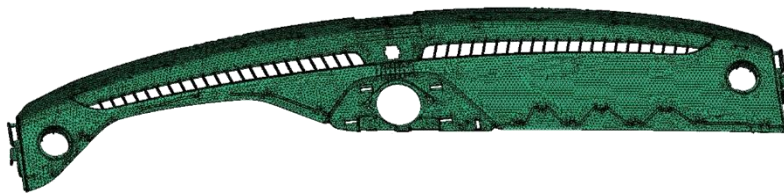
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PRIFER. 2017. Site oficial - Acedido a 17 de Março de 2017. www.prifer.pt
- [2] CEFAMOL (Associação Nacional da Indústria de Moldes). 2017. Site oficial Acedido a 15 de Março de 2017. www.cefamol.pt -
- [3] Gomes, Nuno. 2015. “Indústria Portuguesa de moldes para plásticos: contributos para a sua história”. Marinha Grande. Centimfe
- [4] Yang, Yi, Xi Chen, Ningyun Lu, and Furong Gao. 2016. “Monitoring, and Optimization”. Em Injection Molding Process Control. Munich. Hanser.
- [5] Universidade do Minho e Centro Tecnológico de Indústria de Moldes, “Moldação por injeção e materias plásticos,” em: “Manual do projectista para moldes de injeção de plástico”. Marinha Grande. Centimfe.
- [6] Goodship, Vannessa, Bethany Middleton, and Ruth Cherrington. 2016. Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing. Oxford: W. Andrew.
- [7] Rosato, Dominick V., Donald V. Rosato, and Marlene G. Rosato. 2000. Injection molding handbook. New York: Springer Science Business Media, LLC,.
- [8] Ritz Plastics Inc. 2017. Site oficial. Acedido a 17 de Março de 2017. www.ritzplastics.com
- [9] Shoemaker, Jay. 2006. Moldflow design guide: a resource for plastics engineers. München. Hanser.
- [10] Smith, William F. 1999. Principles of materials science and engineering. New York: McGraw-Hill.
- [11] Kazmer, David. 2017. Injection Mold Design Engineering. Munich. Hanser,
- [12] ABC Radio Australia. 2017. "Colin Austin - Moldflow And After | Innovations.". Última actualização 20 de Fevereiro de 2012. Acedido em 23 de Abril de 2017. <http://www.radioaustralia.net.au/international/radio/onairhighlights/colin-austin-moldflow-and-after>.
- [13] Autodesk. 2017. "Autodesk Completes Acquisition of Moldflow Corporation.". 6 de Fervereiro de 2009. Acedido a 23 de Abril de 2017 <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?id=11469500&siteID=123112>.

9. ANEXOS

9.1. Criação e Correção da Malha

Utilizou-se uma malha do tipo Dual Domain configurada por triângulos com um comprimento de aresta de 5mm, uma altura de corda de 0.3mm e uma tolerância de união de 0.3mm tendo-se obtido a peça representada na figura em baixo.



Mesh Now Job Manager Cancel

Edge Length Mesh Control

Target edge length

☐ * Remesh boundary Preview

Global edge length: 5 mm

☒ * Enable chord height control

* Chord height: 0.3 mm

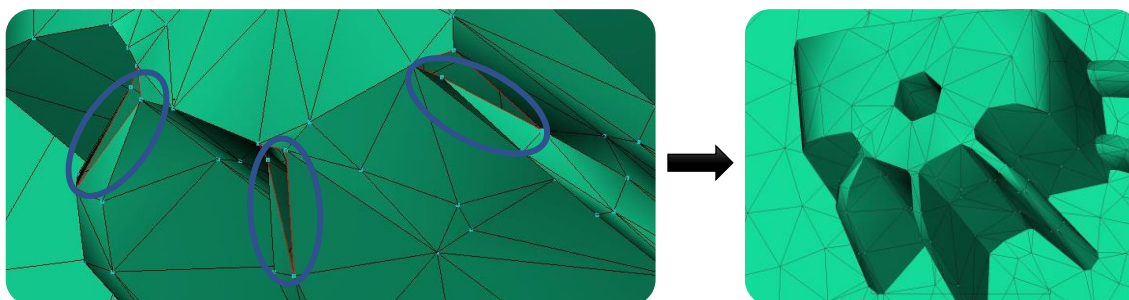
* IGES merge tolerance: 0.3 mm

Parâmetros utilizados para criação da malha e peça depois de gerar a malha

A malha gerada pelo Moldflow normalmente contém erros que devem ser corrigidos para que a simulação dê resultados de confiança. Através da função *Mesh Statistics* foi possível contemplar todos os problemas presentes na malha obtida.

Estado da malha antes da correção	Após correção																																																																																																
Mesh Statistics <table><tr><td colspan="2">Entity counts-----</td></tr><tr><td>Surface triangles</td><td>99413</td></tr><tr><td>Nodes</td><td>49623</td></tr><tr><td>Beams</td><td>0</td></tr><tr><td>Connectivity regions</td><td>1</td></tr><tr><td>Mesh volume</td><td>820.171 cm^3</td></tr><tr><td>Mesh area</td><td>5934.81 cm^2</td></tr><tr><td colspan="2">Edge details-----</td></tr><tr><td>Free edges</td><td>133</td></tr><tr><td>Manifold edges</td><td>149049</td></tr><tr><td>Non-manifold edges</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">Orientation details-----</td></tr><tr><td>Elements not oriented</td><td>0</td></tr><tr><td colspan="2">Intersection details-----</td></tr><tr><td>Element intersections</td><td>3</td></tr><tr><td>Fully overlapping elements</td><td>0</td></tr><tr><td>Duplicate beams</td><td>0</td></tr><tr><td colspan="2">Surface triangle aspect ratio-----</td></tr><tr><td>Minimum aspect ratio</td><td>1.155000</td></tr><tr><td>Maximum aspect ratio</td><td>65.979000</td></tr><tr><td>Average aspect ratio</td><td>2.620000</td></tr><tr><td colspan="2">Match percentage-----</td></tr><tr><td>Match percentage</td><td>89.9%</td></tr><tr><td>Reciprocal percentage</td><td>89.0%</td></tr></table>	Entity counts-----		Surface triangles	99413	Nodes	49623	Beams	0	Connectivity regions	1	Mesh volume	820.171 cm^3	Mesh area	5934.81 cm^2	Edge details-----		Free edges	133	Manifold edges	149049	Non-manifold edges	2	Orientation details-----		Elements not oriented	0	Intersection details-----		Element intersections	3	Fully overlapping elements	0	Duplicate beams	0	Surface triangle aspect ratio-----		Minimum aspect ratio	1.155000	Maximum aspect ratio	65.979000	Average aspect ratio	2.620000	Match percentage-----		Match percentage	89.9%	Reciprocal percentage	89.0%	Mesh Statistics <table><tr><td colspan="2">Entity counts-----</td></tr><tr><td>Surface triangles</td><td>98792</td></tr><tr><td>Nodes</td><td>49279</td></tr><tr><td>Beams</td><td>0</td></tr><tr><td>Connectivity regions</td><td>1</td></tr><tr><td>Mesh volume</td><td>820.347 cm^3</td></tr><tr><td>Mesh area</td><td>5933.86 cm^2</td></tr><tr><td colspan="2">Edge details-----</td></tr><tr><td>Free edges</td><td>0</td></tr><tr><td>Manifold edges</td><td>148188</td></tr><tr><td>Non-manifold edges</td><td>0</td></tr><tr><td colspan="2">Orientation details-----</td></tr><tr><td>Elements not oriented</td><td>0</td></tr><tr><td colspan="2">Intersection details-----</td></tr><tr><td>Element intersections</td><td>0</td></tr><tr><td>Fully overlapping elements</td><td>0</td></tr><tr><td>Duplicate beams</td><td>0</td></tr><tr><td colspan="2">Surface triangle aspect ratio-----</td></tr><tr><td>Minimum aspect ratio</td><td>1.155000</td></tr><tr><td>Maximum aspect ratio</td><td>14.986000</td></tr><tr><td>Average aspect ratio</td><td>2.538000</td></tr><tr><td colspan="2">Match percentage-----</td></tr><tr><td>Match percentage</td><td>89.9%</td></tr><tr><td>Reciprocal percentage</td><td>89.0%</td></tr></table>	Entity counts-----		Surface triangles	98792	Nodes	49279	Beams	0	Connectivity regions	1	Mesh volume	820.347 cm^3	Mesh area	5933.86 cm^2	Edge details-----		Free edges	0	Manifold edges	148188	Non-manifold edges	0	Orientation details-----		Elements not oriented	0	Intersection details-----		Element intersections	0	Fully overlapping elements	0	Duplicate beams	0	Surface triangle aspect ratio-----		Minimum aspect ratio	1.155000	Maximum aspect ratio	14.986000	Average aspect ratio	2.538000	Match percentage-----		Match percentage	89.9%	Reciprocal percentage	89.0%
Entity counts-----																																																																																																	
Surface triangles	99413																																																																																																
Nodes	49623																																																																																																
Beams	0																																																																																																
Connectivity regions	1																																																																																																
Mesh volume	820.171 cm^3																																																																																																
Mesh area	5934.81 cm^2																																																																																																
Edge details-----																																																																																																	
Free edges	133																																																																																																
Manifold edges	149049																																																																																																
Non-manifold edges	2																																																																																																
Orientation details-----																																																																																																	
Elements not oriented	0																																																																																																
Intersection details-----																																																																																																	
Element intersections	3																																																																																																
Fully overlapping elements	0																																																																																																
Duplicate beams	0																																																																																																
Surface triangle aspect ratio-----																																																																																																	
Minimum aspect ratio	1.155000																																																																																																
Maximum aspect ratio	65.979000																																																																																																
Average aspect ratio	2.620000																																																																																																
Match percentage-----																																																																																																	
Match percentage	89.9%																																																																																																
Reciprocal percentage	89.0%																																																																																																
Entity counts-----																																																																																																	
Surface triangles	98792																																																																																																
Nodes	49279																																																																																																
Beams	0																																																																																																
Connectivity regions	1																																																																																																
Mesh volume	820.347 cm^3																																																																																																
Mesh area	5933.86 cm^2																																																																																																
Edge details-----																																																																																																	
Free edges	0																																																																																																
Manifold edges	148188																																																																																																
Non-manifold edges	0																																																																																																
Orientation details-----																																																																																																	
Elements not oriented	0																																																																																																
Intersection details-----																																																																																																	
Element intersections	0																																																																																																
Fully overlapping elements	0																																																																																																
Duplicate beams	0																																																																																																
Surface triangle aspect ratio-----																																																																																																	
Minimum aspect ratio	1.155000																																																																																																
Maximum aspect ratio	14.986000																																																																																																
Average aspect ratio	2.538000																																																																																																
Match percentage-----																																																																																																	
Match percentage	89.9%																																																																																																
Reciprocal percentage	89.0%																																																																																																

Utilizando as ferramentas de reparação de malha manuais, começou-se por tapar as regiões da malha que se encontravam abertas como é o caso da figura em baixo.

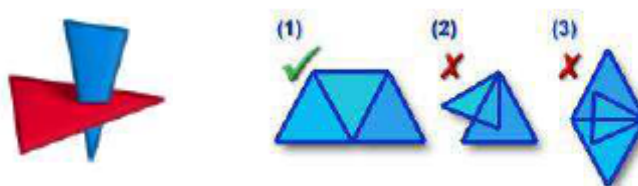


Malha antes e após correção

Com o alinhamento dos nós e com a criação de novos triângulos foi possível fazer um preenchimento completo dos “buracos” usando a função *Fill Hole*.

Depois de fechar toda a malha fez-se uma correção a todos os elementos que possuíam intersecções ou sobreposições. Este tipo de defeito na malha também não permite obter resultados que representem de uma forma fiel o enchimento, pelo que é imperativa a correção da malha. A figura seguinte exemplifica este tipo de defeito.

Através da eliminação e desassociação de triângulos foi possível corrigir os triângulos que se encontravam intersectados. Não existiam triângulos sobrepostos na malha, pelo que não foi necessário tratar esse tipo de defeito.



exemplo de elementos em intersecção (esquerda) e elementos em sobreposição (direita)

Seguidamente foi feita uma correção aos elementos com um elevado fator de forma (>15). A relação de forma de um elemento é a relação entre o lado mais longo e a altura perpendicular a esse lado (a / b na seguinte figura).



Critério de medição para fator de forma

Durante o diagnóstico do fator de forma o software procura por triângulos irregulares, sendo que quanto maior for esta relação mais “achatado” é o triângulo. O cenário ideal é o preenchimento da peça feito pelo máximo de triângulos equiláteros, o que nem sempre é possível. Para uma peça deste tipo, a relação de forma deve estar compreendida entre os 12 e os 15. Esta correção foi obtida através do uso das funções *Swap* e *Merge Triangles*, bem como com o alinhamento dos nós.



Malha antes e após correção

A correção da relação de forma deu-se por concluída quando todos os elementos da peça (99413 elementos) apresentavam uma relação de forma inferior a 15.

Realizou-se também uma análise de espessura. Zonas com espessuras muito finas, abaixo de 0.4mm, são zonas mais propícias a conter malhas deficientes. Através desta análise garantiu-se que estas zonas estavam devidamente caracterizadas e que não iriam originar problemas de simulação.

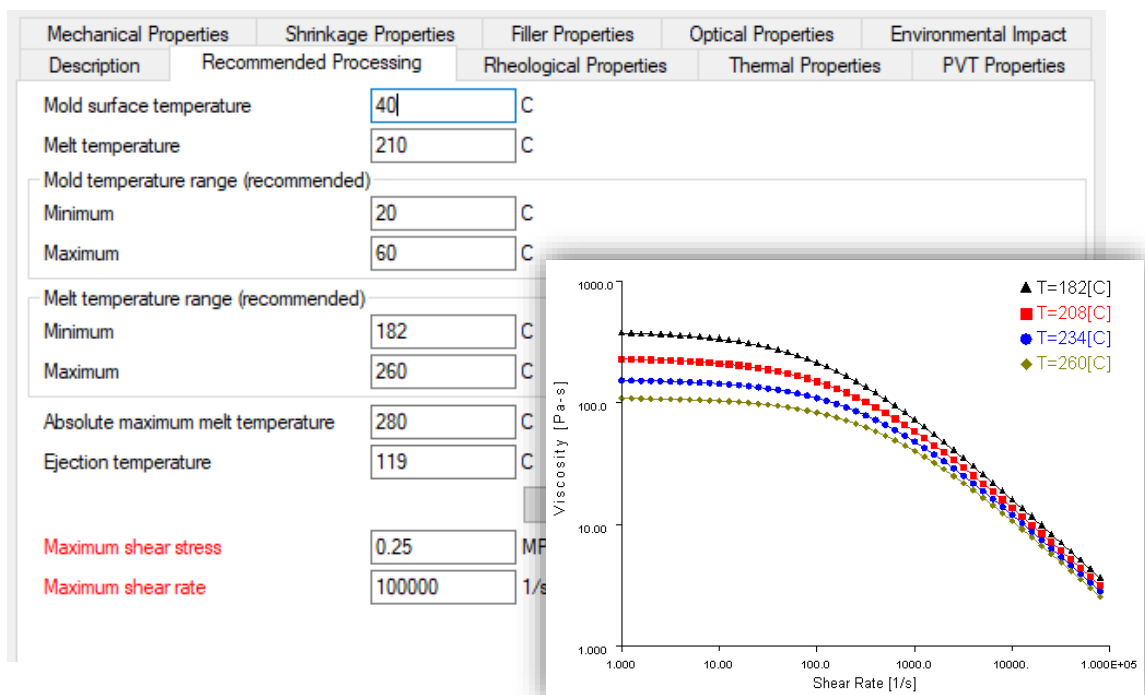
Existe a possibilidade de continuar as operações de correção de malha de modo a obter a malha mais refinada e orientada possível. Quanto maior for o refinamento da malha mais precisas e fidedignas serão as análises e simulações efetuadas. No entanto, com o aumento do refinamento, aumenta também o tempo de cálculo das simulações e para o caso em questão, as condições utilizadas já permitiam obter resultados satisfatórios (*match percentage* > 85%).

9.2. Material utilizado em 5.1

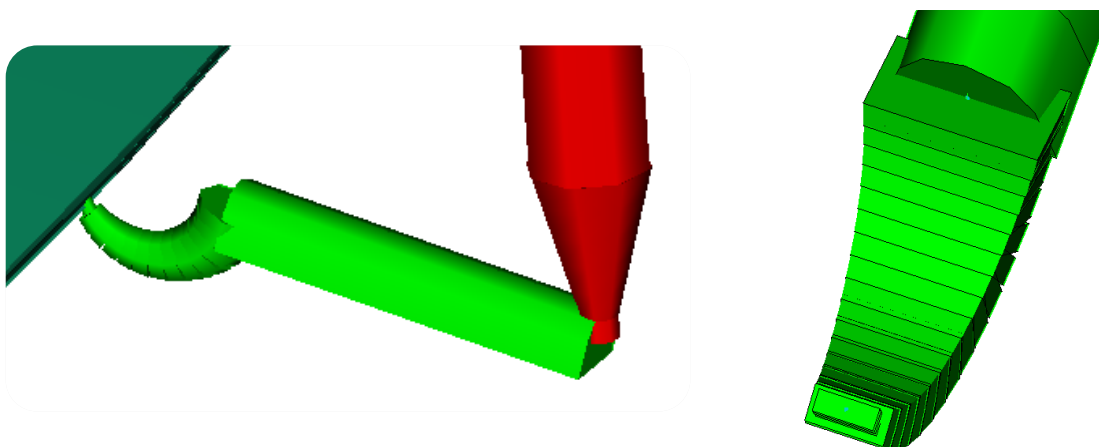
Polipropileno modificado - Sabic PP Compound

Typical values		Revision 20150617	
Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
Polymer properties			
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	dg/min	25	ISO 1133
Density	kg/m³	1020	ISO 1183
Mould shrinkage 24 hours after injection moulding	%	0.8	SABIC method
Mechanical properties			
Tensile test			ISO 527
stress at yield	MPa	20	
stress at break	MPa	13	
strain at break	%	50	
Flexural test			ASTM D790
Flexural modulus	MPa	1900	
Izod impact notched at 23 °C	kJ/m²	25	ISO 180/4A
Charpy impact notched at 23 °C	kJ/m²	25	ISO 179/1eA
Thermal properties			
Heat deflection temperature at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	120	ISO 75/B
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	130	ISO 306/A
Coeff. of linear thermal expansion 23 °C to 80 °C	µm/mK	90	ASTM D696
-30 °C to 30 °C	µm/mK	60	

Propriedades de Material no Moldflow



9.3. Tipo de ataques à peça em 5.1



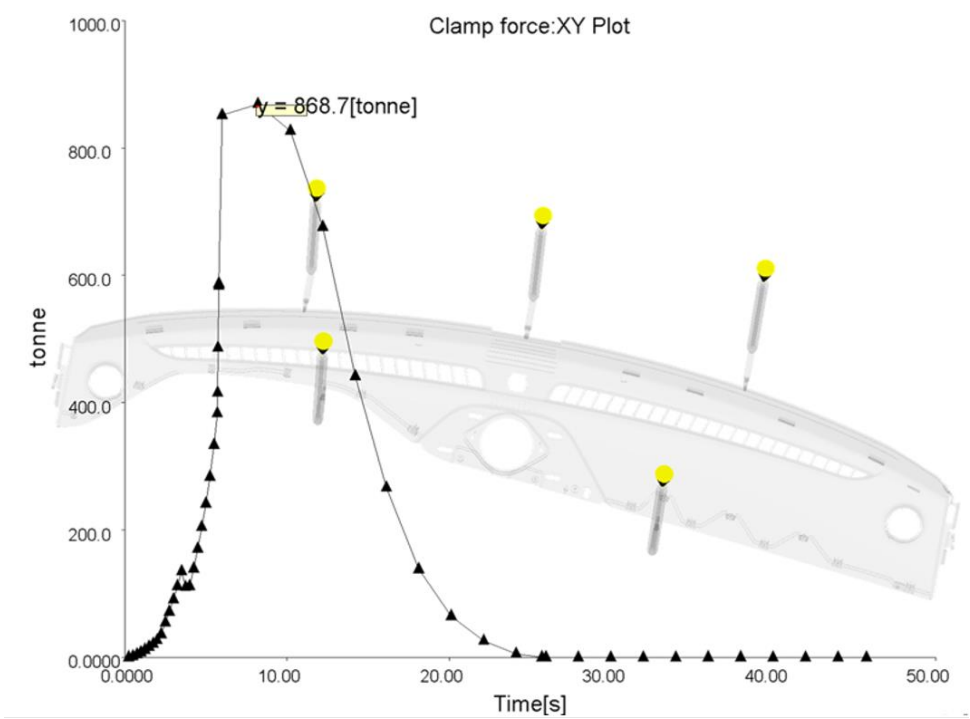
Cylindrical on edge area

Material family : PP		
Size (mm)	Standard	Large
D	8	10
Da	2	2.5
Db	4	5
R / Sh	12 / 3	15 / 3.75
L1	18	22
L2	56	70
L3	24	30

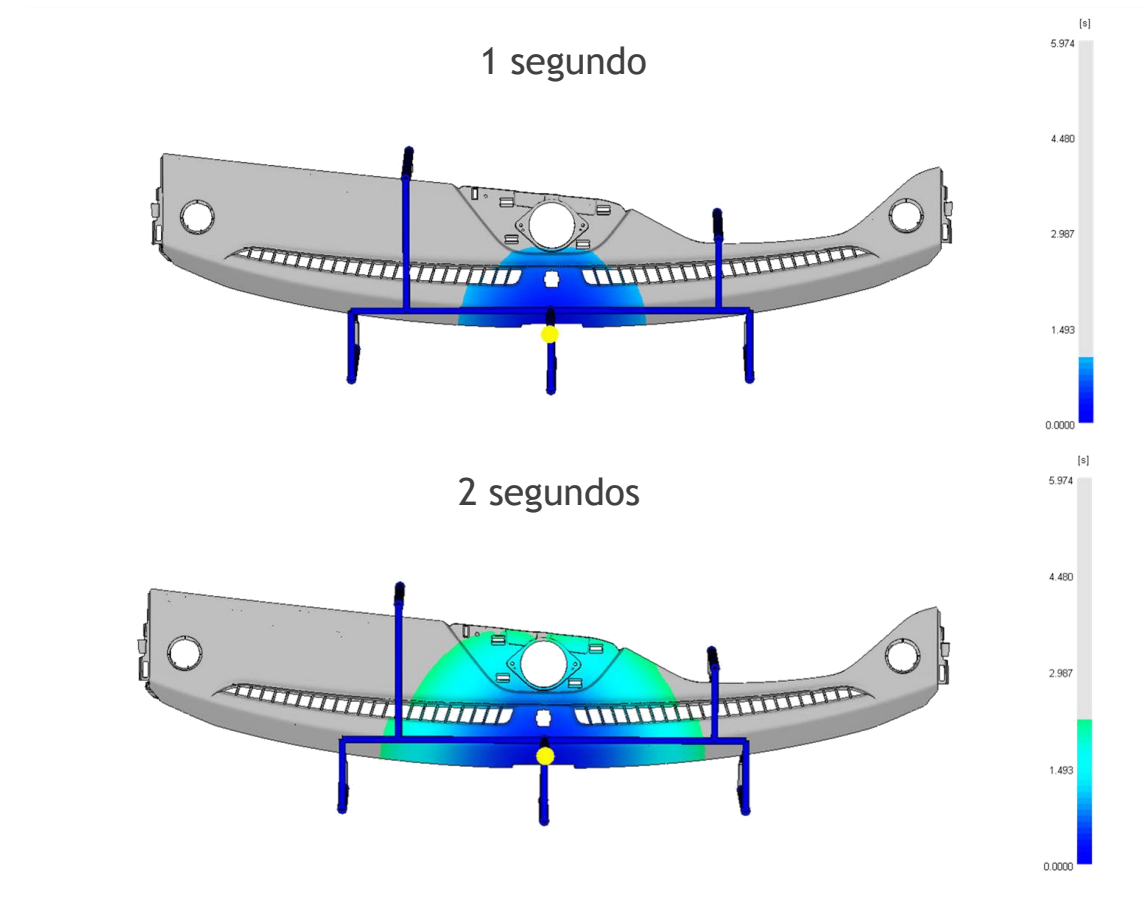
Foram utilizados ataques submarinos curvos para toda a peça. Este tipo de ataques deixa uma marca muito pouco visível na peça e para além disso, estes separam-se automaticamente da peça com a abertura do molde. Devido ao grande débito de material do ataque central, foi utilizado o mesmo ataque, mas com secção retangular maior de modo a facilitar a entrada de material na peça.

9.4. Resultados obtidos em 5.1

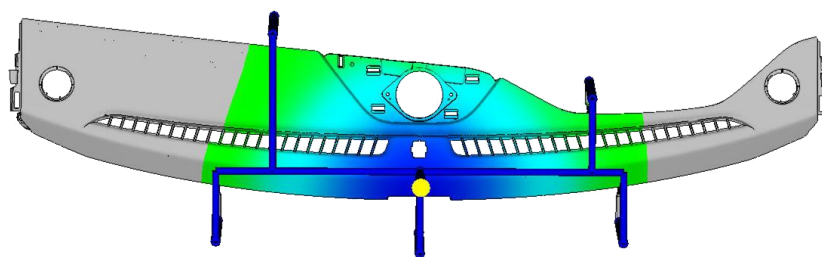
Força de Fecho:



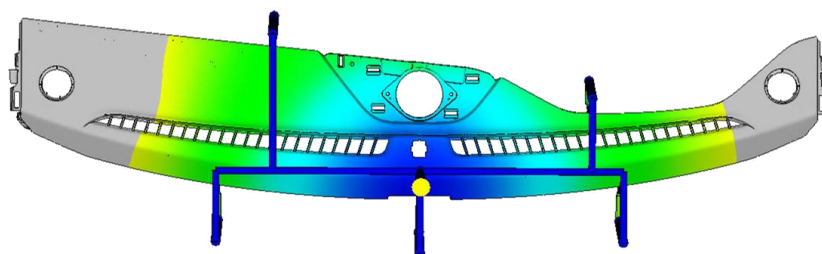
Tempo de enchimento:



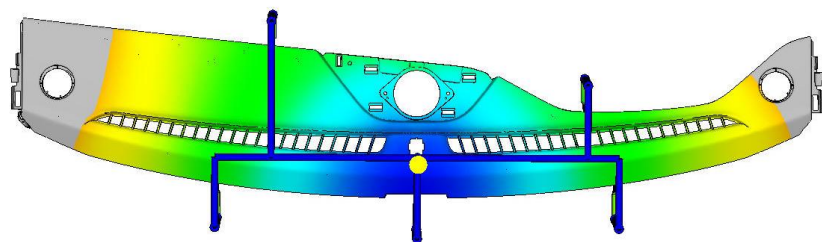
3 segundos



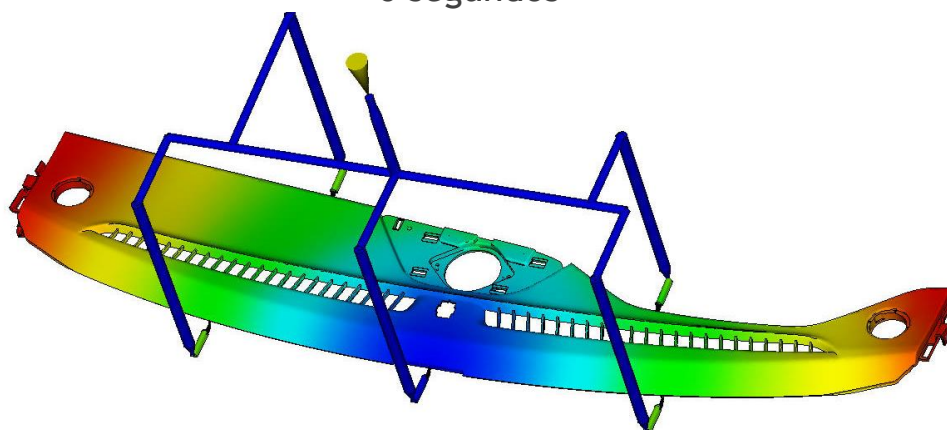
4 segundos



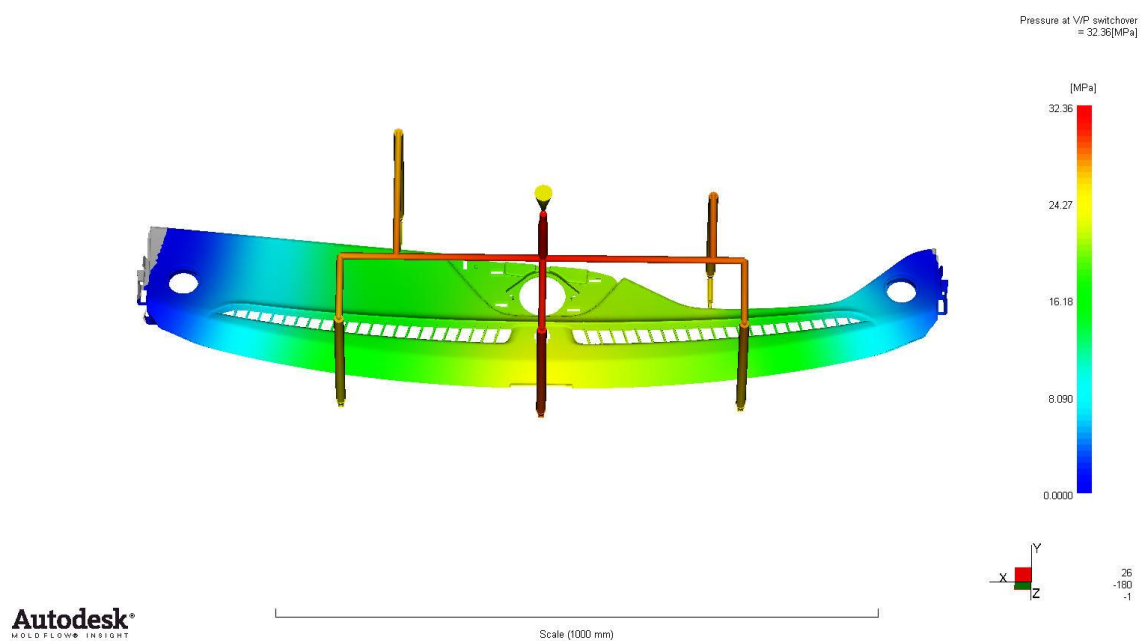
5 segundos



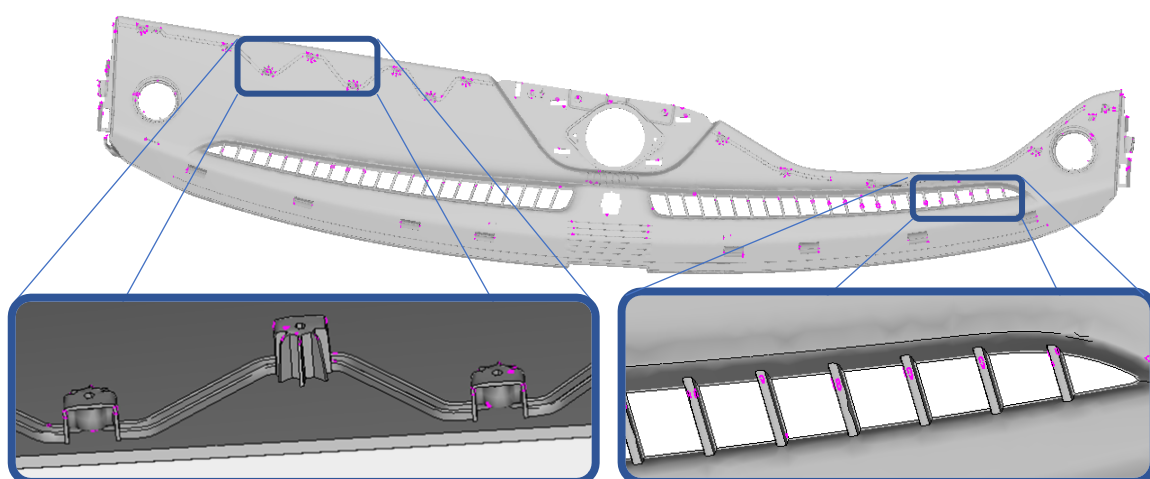
6 segundos



Pressão no ponto de comutação



Prisões de ar



Linhas de soldadura



9.5. Parâmetros de Injeção em 5.1

Process Settings Wizard - Cool Settings - Page 1 of 3

Mold surface temperature: 50 C
Melt temperature: 240 C
Mold-open time: 18 s [0:600]
Injection + packing + cooling time: Specified of 45 s [0:6000]
Cool solver parameters...

< Anterior Seguinte > Cancelar Ajuda

Process Settings Wizard - Fill+Pack Settings - Page 2 of 3

Filling control
Injection time: 5 s [0:]
Velocity/pressure switch-over: By %volume filled at 98 % [0:100]
Pack/holding control: Packing pressure vs time Edit profile...
Advanced options...
Fiber parameters...
☒ Fiber orientation analysis if fiber material

< Anterior Seguinte > Cancelar Ajuda

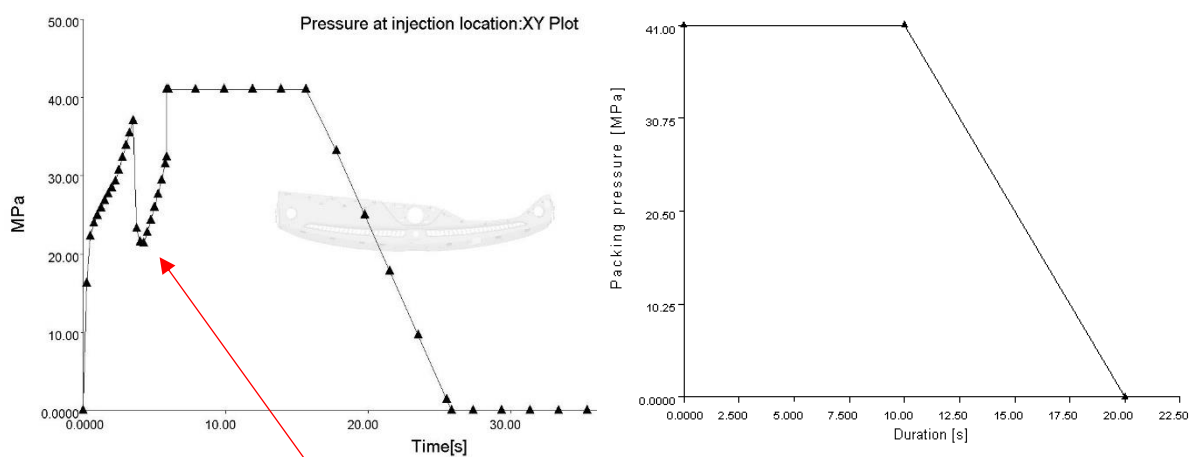
Process Settings Wizard - Warp Settings - Page 3 of 3

☐ Consider mold thermal expansion
☒ Isolate cause of warpage
☐ Consider corner effects
Matrix solver: Automatic

Fill + Pack Analysis Advanced Options

Molding material: ADX_5017 : Advanced Composites In Edit... Select...
Process controller: Process controller defaults Edit... Select...
Injection molding machine: Default injection molding machine Edit... Select...
Mold material: Tool steel P-20 Edit... Select...
Solver parameters: Thermoplastics injection molding solve Edit... Select...

Pressão no ponto de injeção e perfil de compactação:



Queda de pressão provocada pela abertura dos restantes bicos de injeção

9.6. Parâmetros para análise de arrefecimento

Coolant inlet ? X

Coolant
Water (pure) #1 Edit... Select...

Coolant control
Specified flow rate Flow rate 15 lit/min (0:1.2e+004)

Coolant inlet temperature 20 C [-120:500]

Name Coolant inlet property 3

OK Cancelar Ajuda

Cool Solver Parameters ? X

Mold temperature convergence tolerance 0.50000 [0.00001:0.5]

Maximum number of mold temperature iterations 50 [10:10000]

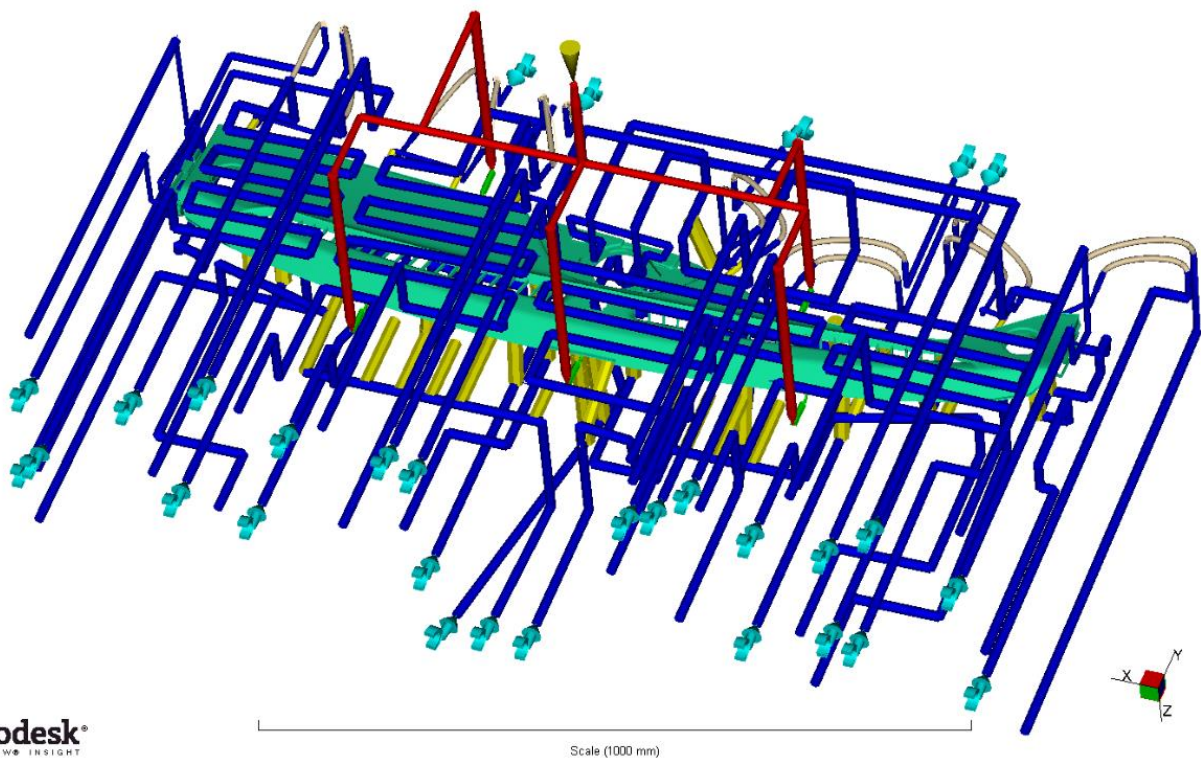
Method for calculating geometric influence
Ideal

☐ Include runners in automatic cooling time calculations

☒ Use aggregated mesh solver

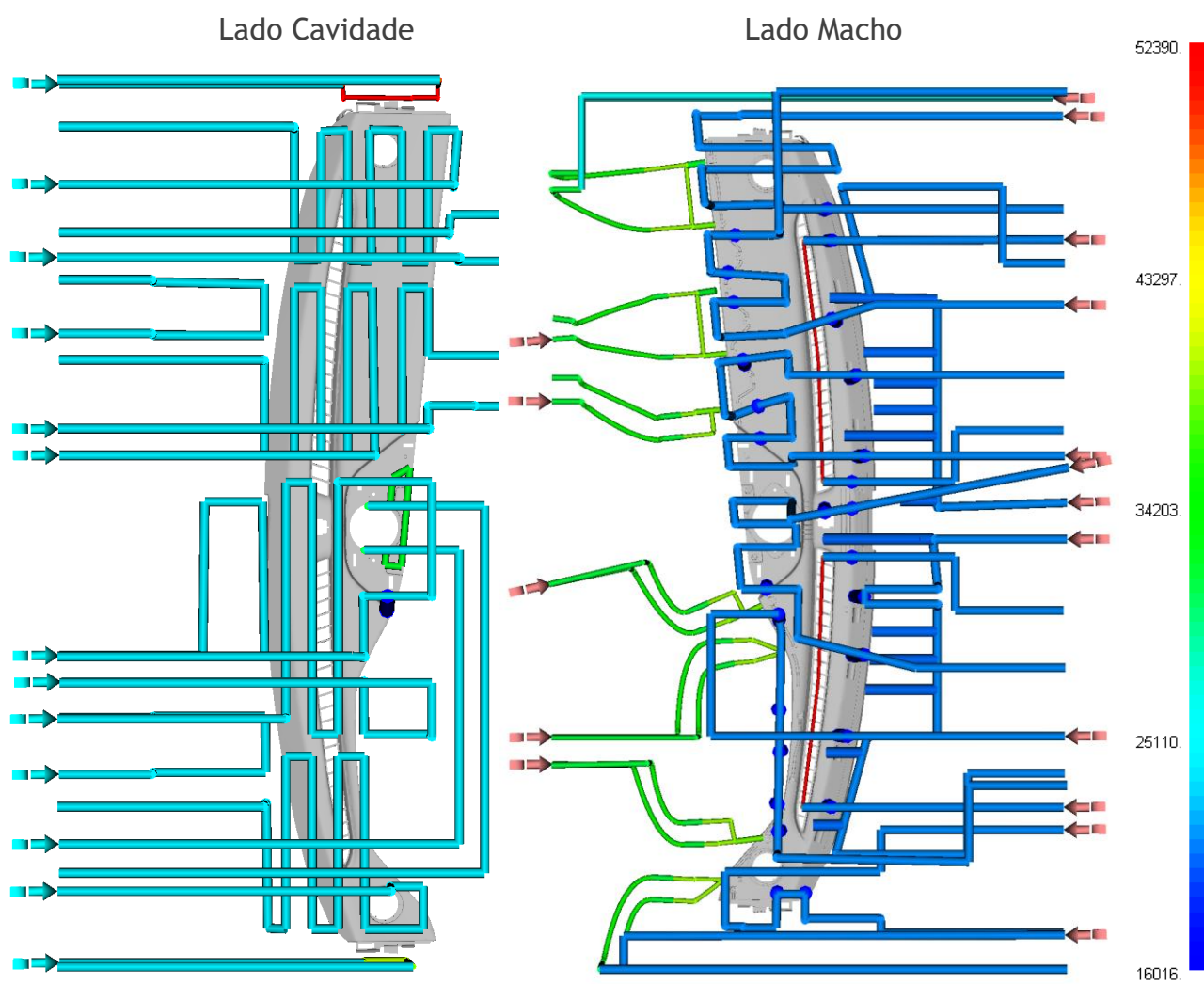
OK Cancelar Ajuda

Modelo pronto para análise



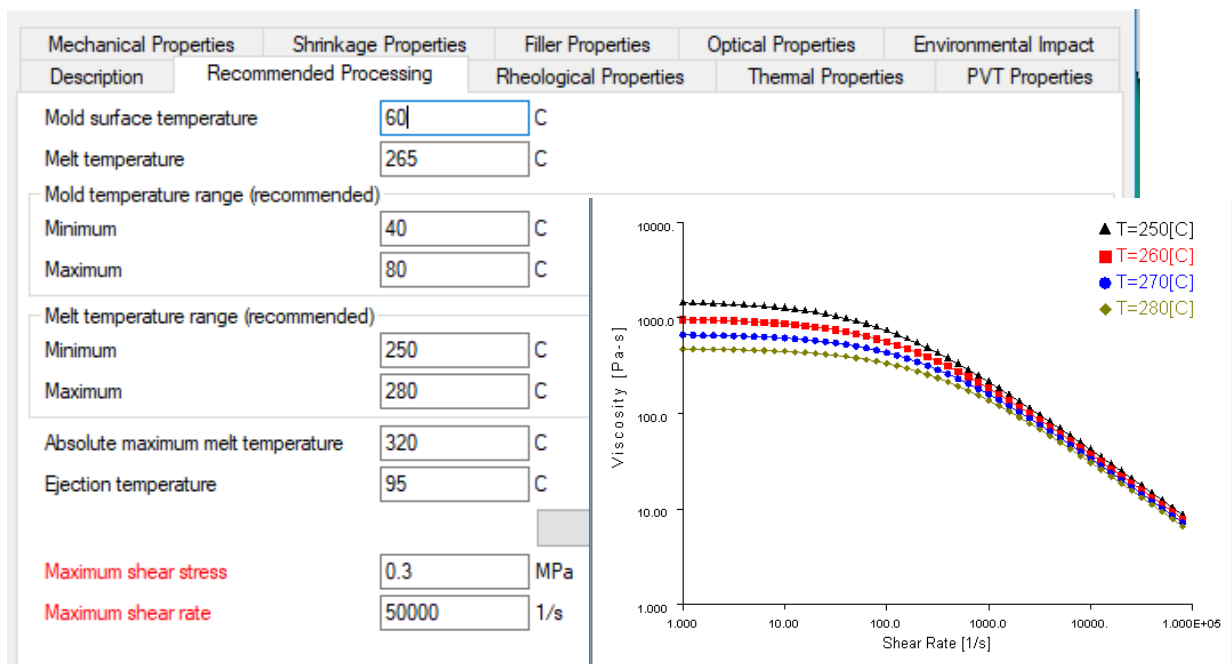
9.7. Resultados da Simulação

Número de Reynolds



9.8. Molde 1

Material:



Parâmetros de injeção:

Process Settings Wizard - Fill+Pack Settings - Page 1 of 2

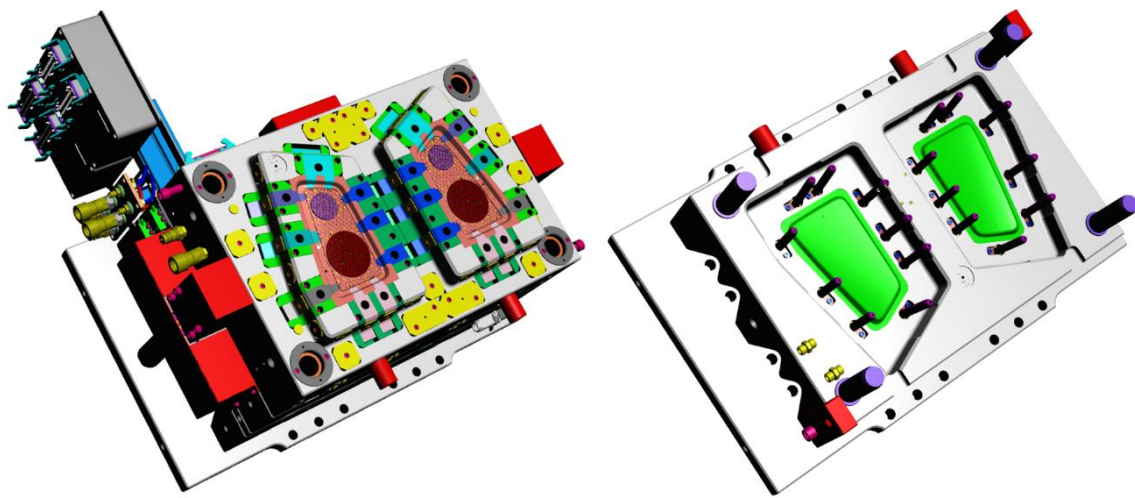
? X



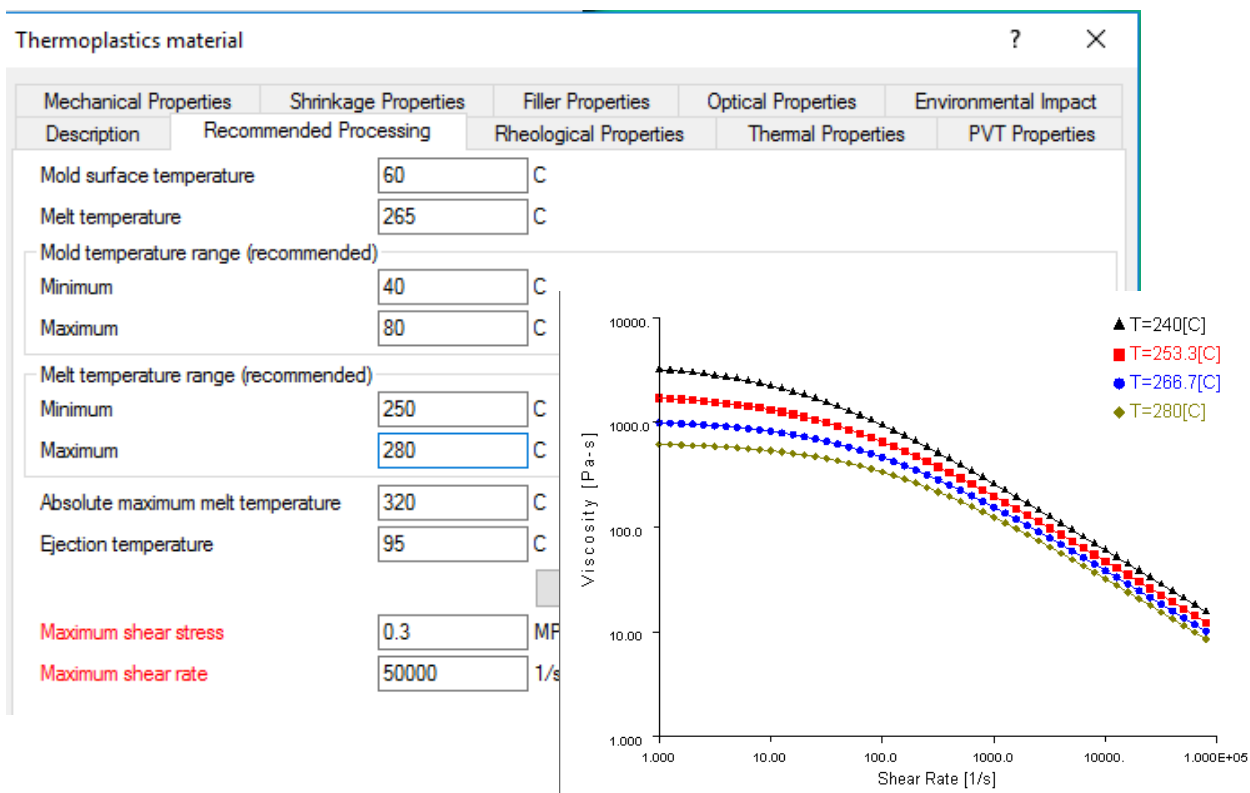
Mold surface temperature	70	C
Melt temperature	270	C
Filling control		
Injection time	5	s [0:]
Velocity/pressure switch-over		
By %volume filled	98	% [0:100]
Pack/holding control		
Packing pressure vs time	Edit profile...	
Cooling time		
Specified	20	s [0:]
☒ Fiber orientation analysis if fiber material		
Advanced options...		
Fiber parameters...		

9.9. Molde 2

Parte móvel (esquerda) parte fixa (direita)



Material:

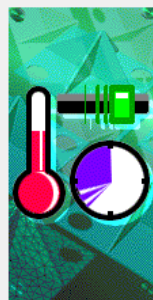


Parâmetros de injeção:

Process Settings Wizard - Fill+Pack Settings - Page 1 of 2

?

×



Mold surface temperature

C

Melt temperature

C

Filling control

Injection time of s [0:]

Velocity/pressure switch-over

By %volume filled at % [0:100]

Pack/holding control

Packing pressure vs time

Cooling time

Specified of s [0:]

☒ Fiber orientation analysis if fiber material

< Anterior

Seguinte >

Cancelar

Ajuda