



Pedro Domingues Rodrigues

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Simulação em *Moldflow Insight*
da injeção de veios de engrenagens de precisão
para previsão de empenos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz, Professor Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Gabriel Ribeiro, Engenheiro, PhD ,
Edilásio Carreira da Silva, Lda



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Simulação em *Moldflow Insight* da injeção de veios de engrenagens de precisão para previsão de empenos

Copyright © Pedro Domingues Rodrigues, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e irmão

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação teve o auxílio e apoio de várias pessoas ao longo da sua construção às quais agradeço abaixo:

Ao professor Daniel Vaz pela orientação, disponibilidade e apoio que prestou durante esta fase.

Ao professor António Mourão também pelo apoio e disponibilidade especialmente na fase inicial da proposta da tese.

À professora Carla Machado pelo acompanhamento com o *software Moldflow Insight*.

Ao grupo Iberomoldes pelo meu acolhimento que permitiu a construção desta dissertação mais concretamente ao Eng. Gabriel Ribeiro por todo o acompanhamento e dedicação prestados durante esta fase, ao Eng. António Pina e ao Mário Freitas pelo acolhimento no grupo e na empresa Edilásio.

A todos os trabalhadores que me auxiliaram na empresa Edilásio.

À CADFlow nomeadamente ao Miguel Teixeira pelo apoio fornecido na utilização do *Moldflow Insight*.

Aos trabalhadores da empresa Teste pela sua colaboração nos ensaios efetuados.

E finalmente agradeço à minha família que me acompanhou durante esta fase de final de curso.

RESUMO

O setor industrial dos polímeros é um dos mais ativos e dinâmicos em Portugal. Esta indústria encontra-se em expansão e desenvolvimento contínuo e acompanhando este progresso estão desafios emergentes.

Um dos maiores desafios desta indústria é reduzir a taxa de correções nos moldes de injeção. Uma grande parte destas correções são devidas a defeitos geométricos (empeno) que desrespeitam tolerâncias impostas pelos clientes. Desta forma torna-se necessário estudar os fenómenos envolvidos no empeno de modo a melhorar a eficiência do processo de materialização de uma peça polimérica. Por conseguinte aumenta-se a competitividade das empresas neste setor tecnológico.

Nesta dissertação estuda-se um conjunto de peças pertencentes a uma engrenagem de um contador de água nas quais eram observados consistentemente empenos que desrespeitavam uma norma de batimento imposto em cada roda dentada. Este conjunto de peças é fabricado com ferramentas concebidas pela empresa Edilásio pertencente ao grupo Iberomoldes. A empresa acolhedora propôs a resolução deste desafio através de métodos de simulação numérica.

O recurso à computação tende cada vez mais a ser usado em várias indústrias distintas onde não é exceção a indústria dos moldes de injeção plástica. Estas ferramentas, nos últimos anos, têm tido uma evolução drástica e tornam-se cada vez mais acessíveis devido também à disponibilidade de maior capacidade de processamento.

Este estudo em particular foi desenvolvido com recurso ao *Moldflow Insight* para as análises efetuadas.

Verifica-se que, para peças com grandes variações de massa, a geometria do artigo toma um papel fundamental no seu empeno bem como a geometria, dimensão e posição do ataque. As variáveis de processo têm também uma pendor com muito peso na resposta geométrica.

Palavras-chave: Injeção de polímeros; Moldes; Simulação numérica; Polióxidometileno; Poliacetal; Rodas dentadas; Reologia; Moldflow.

ABSTRACT

The polymer industrial sector is one of the most active and dynamic in Portugal. This industry is expanding and in continuous technological development which is accompanied by new and emerging challenges.

One of the biggest challenges in this industry is reducing the rate of corrections applied in injection molds. A great part of these corrections is due to geometric defects (warps) that disrespect geometric tolerances imposed by clients. It becomes necessary to study the phenomena involved in warp in order to improve the process of materialization of a polymer part. Therefore one improves the competitiveness of companies situated in this technological sector.

In this dissertation, it is presented a study on a set of gears belonging to a domestic water meter in which was observed warpage that surpassed the runout tolerance imposed. This set of parts is manufactured by tools conceived by the company Edilásio which belongs to Iberomoldes group. The fostering company proposed the resolution of this challenge through numeric simulation methods.

The recourse of computing nowadays tends to be prevalent in many distinct industries in which the injection molding industry is no exception. This resource, in the last few years, has been going through a drastic evolution, becoming increasingly accessible also due to the availability of a bigger processing capability.

This study, in particular, was developed with the recourse to *Moldflow Insight* for every simulation analysis made.

In this dissertation, it is verified that with great mass variations, the part geometry plays a central role in its warpage as well as its gate's geometry, dimension, and position. The injection process variables also play a very significant role on the part's geometric response.

Keywords: Plastic injection; Polymer; Molds; Numeric Simulation; Polioximethylene; Poliacetal; Gears; Rheology; Moldflow.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Técnica de injeção de polímeros	5
2.1 Descrição	5
2.2 Estado da arte	8
2.2.1 Tecnologia de injeção	8
2.2.2 Simulação numérica de injeção de polímeros	17
3 Materiais e Métodos	19
3.1 Família de peças	19
3.2 Polióximetileno	20
3.2.1 Descrição de Polióximetileno	20
3.2.2 Propriedades do material	22
3.3 Quantificação do empeno e artigo para referência base	23
3.4 Simulação da injeção plástica	26
3.4.1 Moldflow Insight	26
3.4.2 Domínio computacional e discretização	28
4 Resultados	33
4.1 Pressupostos	33
4.2 Alterações geométricas	34
4.2.1 Ataque	34
4.2.2 Diâmetros das rodas dentadas	39
4.2.3 Concordâncias	40
4.2.4 Nervuras	40

ÍNDICE

4.2.5	Vazios	42
4.2.6	Espessuras	43
4.3	Alterações das variáveis de injeção	43
5	Conclusão	47
5.1	Principais Conclusões	47
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	48
	Bibliografia	51
I	Hostaform POM C9021 - Ficha técnica	53
II	Folha de Teste - Variáveis de processo e características da máquina injetora	61

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo de um artigo sem desvios geométricos (esquerda) e com empeno (direita) (adaptado de [1])	2
1.2	Exemplo de uma roda dentada pertencente à família de peças	2
2.1	Esquema de um escoamento e representação das tensões residuais criadas no escoamento (adaptado de [2])	6
2.2	Esquema do fenômeno de arrefecimento causador de deformações geométricas	7
2.3	Esquema de um molde de canais frios de duas cavidades (adaptado de [4])	9
2.4	Esquema de um sistema de canais de alimentação de quatro cavidades (adaptado de [5])	10
2.5	Fases de abertura de um molde de 3 placas (adaptado de [4])	11
2.6	Esquema das unidades de uma máquina injetora com fuso rotativo (adaptado de [5])	12
2.7	Fases de um ciclo de injeção (adaptado de [5])	13
2.8	Variação do volume com a temperatura para polímeros de estruturas distintas (adaptado de [5])	15
2.9	Comportamento reológico de diversos tipos de fluídos (adaptado de [5])	15
2.10	Curva de fluxo típica de um termoplástico (adaptado de [5])	16
2.11	Classificação comercial de termoplásticos (adaptado de [5])	16
2.12	Fluxograma de uma análise de enchimento típica	17
3.1	Diferentes tipos de formas de rodas dentadas	19
3.2	Vista de corte de uma zona moldante exemplo	20
3.3	Representação da estrutura molecular de um polímero semicristalino (adaptado de [5])	21
3.4	Exemplos de aplicações comuns do polímero POM (adaptado de [7])	21
3.5	Variação da viscosidade do <i>Hostaform</i> [®] POM C 9021 pela temperatura e taxa de corte (retirado de Moldflow)	22
3.6	Variação da viscosidade do volume com a temperatura e pressão do <i>Hostaform</i> [®] POM C 9021 (retirado de Moldflow)	23
3.7	Desenho cotado do artigo de referência	24
3.8	Montagem de equipamentos usada na medição dos artigos injetados	24
3.9	Medição do perfil de batimento do artigo de referência base	25

3.10 Plano onde ocorre o defeito (a) e locais escolhidos para a medição do batimento (b)	26
3.11 Menu apresentado pelo <i>Moldflow</i> para a escolha da sequência de simulações.	27
3.12 Menu para escolha do material na base de dados fornecida pela <i>AutoDesk</i> .	27
3.13 Tipos de malhas disponibilizadas pelo <i>Moldflow</i> (adaptado de [11])	28
3.14 Variação do batimento e tempo de simulação com o tamanho de elementos finitos	29
3.15 Configurações adotadas para a simulação. Inicial em (a) e simplificada em (b)	30
3.16 Perfil do cilindro e fuso da máquina injetora com curso utilizado na injeção .	31
4.1 Artigo de referência para simulações	33
4.2 Configuração do ataque - à esquerda tem-se representada a localização e configuração do ataque na peça de referência, no meio tem-se a configuração com diâmetro menor e à direita tem-se a configuração com diâmetro máximo. . .	34
4.3 Variação do desvio dos apoios ao eixo da peça em função do diâmetro do ataque	35
4.4 Desvios dos apoios em função do diâmetro do ataque	35
4.5 Resultados de velocidade, taxa de tensões de corte e temperatura a aproximadamente 50% do enchimento da cavidade	36
4.6 Resultados de temperatura sequenciais (três primeiros fotogramas) e contração volumétrica (quarto fotograma)	37
4.7 Variação do número de Mach e desvio do apoio inferior com o diâmetro do ataque	37
4.8 Dispersão de temperaturas no plano onde ocorre o empeno das configurações com ataque (a preto) alternativo	38
4.9 Variação do batimento com a distância ao eixo do artigo não deformado . . .	39
4.10 Variação do batimento com o diâmetro das rodas dentadas	39
4.11 Variação do batimento com o raio das concordâncias entre o apoio superior e a roda dentada maior (a) e entre o apoio inferior e a roda dentada maior(b) .	40
4.12 Configurações de nervuras simuladas - nervura superior (a), nervura inferior (b), nervuras superior e inferior (c), veio cônico (d) e sem qualquer nervura (e)	40
4.13 Contração da configuração (c) e (d) no plano onde ocorre o empeno	41
4.14 Configurações das simulações dos vazios - Sem vazio (a), vazio com 0.5mm de espessura (b) e vazio de referência (c)	42
4.15 Variação do batimento com o tamanho do vazio no interior da roda dentada menor. A dimensão usada no eixo das abcissas é medida desde a face interior da roda dentada menor até à superfície do veio.	43
4.16 Variação do batimento com a espessura da roda dentada maior	43

LISTA DE TABELAS

4.1	Resultados do batimento para o ataque superior, inferior e lateral	38
4.2	Valores de desvios e batimento das simulações de configurações com nervuras	41
4.3	Batimento medido da peça de referência com as variáveis de referência. . . .	44
4.4	Batimento medido nas moldações com velocidades de injeção alteradas. . . .	44
4.5	Batimento medido nas moldações de compactação alterada.	44
4.6	Batimento medido nas moldações com o tempo de arrefecimento alterado . .	45

NOMENCLATURA

$\emptyset_{Cilindro}$	Diâmetro interior do cilindro da máquina injetora.
\emptyset_x	Diâmetro dos ataques nas variações simuladas.
P	Pressão de compactação.
t_1	Tempo para o fuso percorrer x_1 à velocidade v_1 .
t_2	Tempo para o fuso percorrer x_2 à velocidade v_2 .
$t_{arrefecimento}$	Tempo de arrefecimento do artigo no molde.
T_f	Temperatura de fusão de um polímero.
T_g	Temperatura de transição vítrea de um polímero .
v_1	Velocidade no percurso de x_1 .
V_1	Volume injetado no percurso x_1 .
v_2	Velocidade no percurso de x_2 .
v_{inj}	Velocidade de injeção.
$V_{injetado}$	Volume total injetado para o interior do molde.
x_1	Distância inicial percorrida pelo fuso .
x_2	Distância final percorrida pelo fuso.

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Como trabalho final no curso de engenharia mecânica foi proposta a resolução da dissertação em colaboração com o grupo empresarial Iberomoldes mais concretamente na empresa Edilásio. Este grupo está inserido na indústria de injeção de polímeros que inclui projeto e fabrico de ferramentas para injeção (moldes), injeção de peças, pintura e montagem.

Esta indústria tem demarcado a sua presença em Portugal desde a década de 50 e representa uma das maiores contribuições num setor tecnológico moderno e em constante progresso.

Este setor tecnológico, tal como muitos outros, necessita de um acompanhamento constante ao nível da engenharia visto que as ferramentas são distintas entre si. Devido à heterogeneidade entre cada molde, surgem várias complicações, tanto a nível de conceção da ferramenta como do seu uso. Uma das principais preocupações é o rigor geométrico do produto final injetado. Ou seja, as impressões injetadas têm de respeitar tolerâncias geométricas, entre outras condições, impostas pelos clientes. A este fenómeno de distorção dá-se o nome de empeno (figura 1.1).

Este fenómeno é recorrente em vários tipos de geometrias especialmente em cascas finas. Nesta dissertação são abordadas geometrias com grandes variações de espessura que tipicamente não apresentam tantos problemas deste tipo. No entanto verifica-se que nos objetos de estudo está presente este defeito.

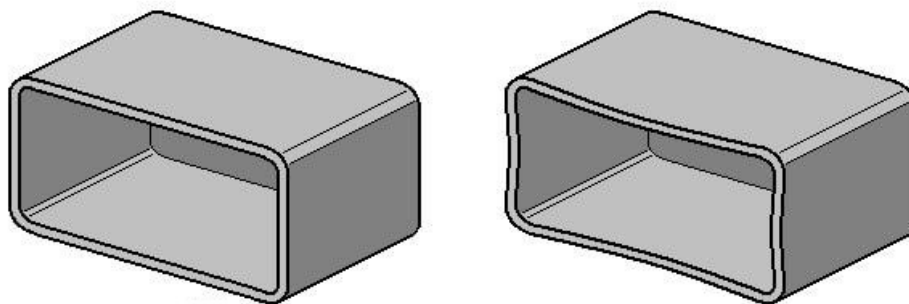


Figura 1.1: Exemplo de um artigo sem desvios geométricos (esquerda) e com empeno (direita) (adaptado de [1])

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo fenomenológico dos mecanismos associados ao empeno com vista à sua resolução numa família de peças onde este defeito foi observado. As peças sob análise são rodas dentadas pertencentes a uma engrenagem de um contador de água doméstico. Estas rodas dentadas incluem o veio com os apoios nos extremos como se observa na figura 1.2.

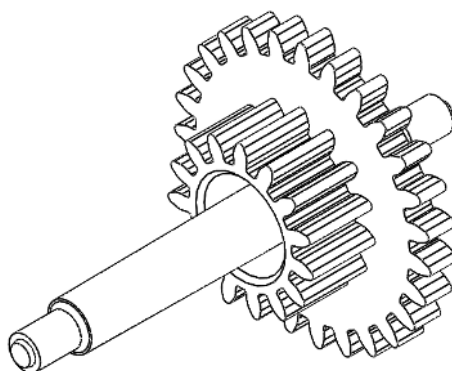


Figura 1.2: Exemplo de uma roda dentada pertencente à família de peças

Pretende-se estudar este tema com recurso ao *Moldflow Insight*. Este programa é um programa de *CFD* (*Computer Fluid Dynamics*) preparado para a tecnologia de injeção plástica que visa simular as respostas reais de um sistema reológico.

Inicialmente tenciona-se perceber qual o problema encontrado e quantifica-lo através de observação e medição do defeito registado pela empresa. Segundo a empresa acolhedora trata-se de uma não conformidade na tolerância de batimento das superfícies dos dentes das rodas dentadas. Seguidamente pretende-se recrear a situação de injeção utilizada nos testes do molde que obtiveram o defeito em causa. Neste processo pretende-se observar os fenómenos associados para que, em conjunto com a informação da literatura, se entendam quais as razões para a obtenção do defeito.

Verificando-se que os fenómenos reais estão corretamente definidos no simulador, parte-se para uma etapa de exploração da afetação das variáveis **geometria** e **parâmetros**

de injeção utilizando tanto o *Moldflow* como ensaios numa máquina injetora.

Finalmente ao observar as características das geometrias e variáveis de injeção escolhidas e os fenómenos associados pretende-se solucionar o problema preferencialmente de uma forma menos dispendiosa como grandes alterações geométricas

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação, excetuando a introdução, tem como estrutura as unidades abaixo descritas:

Técnica de injeção de polímeros - Descrição do meio envolvente da indústria da injeção plástica e seus principais intervenientes; Descrição dos procedimentos normais para a obtenção de uma peça plástica; Identificação da reologia e descrição do fenómeno do empeno e suas causas. Identificação do simulador *Moldflow Insight* e contextualização; Descrição do estado da arte da técnica de injeção (molde e máquina injetora e materiais); Descrição do estado da arte de simuladores numéricos na indústria de injeção.

Materiais e métodos - Identificação da família de peças em estudo e respetivo molde; Descrição do Polióxidometileno e suas propriedades; Método de quantificação do empeno e artigo para referência base; Identificação das funcionalidades do *Moldflow Insight* e a sequência usada na dissertação; Descrição do domínio computacional escolhido para simular a injeção da peça para referência base. Simplificações no modelo para referência base.

Resultados - Explanação dos resultados obtidos com alterações geométricas a partir do artigo de referência base e discussão acerca dos fenómenos envolvidos para a resposta; Explanação dos resultados obtidos com alterações nas variáveis de injeção e respetiva discussão.

Conclusões - Identificação de premissas que se podem retirar dos teste efetuados com vista à criação de um modelo de previsão de defeitos para geometrias similares; Identificação de possíveis trabalhos futuros a efetuar no ramo da injeção de polímeros.

TÉCNICA DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS

2.1 Descrição

A tecnologia de injeção plástica vigente hoje é um ramo da indústria bastante competitivo e ativo em Portugal. Como tal existem vários intervenientes com setores de atividade simbiótica entre si. Isto é, a indústria nacional, ao longo do tempo, ao tomar a sua posição no mercado mundial nas tecnologias das peças plásticas, desenvolveu conjuntos de entidades responsáveis não só pela injeção dos artigos finais mas também pela conceção das ferramentas e conhecimento necessário para a sua utilização correta.

Pode-se dividir a conceção de uma peça polimérica em 3 etapas principais excluindo a sua subsequente montagem ou outros acabamentos:

- **Concepção e projeto** da peça
- **Fabrico do molde**
- **Injecção** do artigo

Inicialmente a entidade interessada na criação de um artigo tem de idealizar e projetar uma peça que tem uma função específica. Esta peça projetada tem de ser adequada às capacidades da tecnologia de injeção, que é um fator por vezes pouco estudado por parte de quem projeta o artigo. Desta forma as entidades responsáveis pela etapa seguinte (concepção do molde), tem uma necessidade constante de adaptação face aos desafios postos pelas diversas variáveis impostas pelos seus clientes. Desta forma existe uma comunicação frequente e construtiva especialmente nos momentos iniciais da conceção do molde face ao artigo pretendido.

O molde é então negociado mediante as expectativas do cliente quanto à sua complexidade, quanto ao número de moldações por unidade de tempo pretendido, e quanto

ao tipo de tecnologias e/ou materiais usados. Tem-se como exemplo um molde para o fabrico de um componente automóvel que não necessitará *a priori* de um grande volume de produção de peças por unidade de tempo visto que o número de artigos necessários para a produção de um modelo não o justifica. No entanto um artigo como um copo plástico descartável necessitará de um grande número de espécimes injetados por unidade de tempo tendo em conta a perenidade da sua utilização. Logo um molde para injetar os copos descartáveis deverá conter um maior número de cavidades e um menor tempo de injeção que uma peça automóvel. Este menor tempo de injeção também requererá possivelmente uma capacidade de arrefecimento maior que a anterior.

Posto isto consegue-se perceber que existe uma dinâmica bastante ativa na construção deste tipo de ferramentas o que implica uma maior atenção aos fenómenos inerentes à tecnologia. O ramo da ciência responsável por estudar os fenómenos de escoamentos e deformações em matéria é a reologia. Esta está presente desde 1929 com especial incidência nos Estados Unidos da América e tem sido fundamental na compreensão dos fenómenos associados à injeção de polímeros e aos defeitos obtidos.

A reologia toma um papel preponderante nos estudos de materiais com comportamentos viscoelásticos como é o caso dos polímeros. Incide não só no seu comportamento no estado líquido como também no estado sólido. Desta forma, a reologia conseguiu ao longo do tempo prever e quantificar vários tipos de fenómenos ocorrentes em materiais atípicos como polímeros em situações bastante distintas.

Esta dissertação incide principalmente no **empeno**, ou seja, na deformação da peça no final da sua injeção. Este fenómeno de deformação é bastante comum na indústria e é um dos grandes objetos de estudo da reologia.

São conhecidas as razões para este tipo de deformações que se prendem com fenómenos térmicos que provocam tensões residuais e conseqüentemente poderão trazer deformações significativas. Na figura 2.1 observa-se um esquema de um escoamento onde se demonstra que o polímero, ao preencher a lacuna, solidifica rapidamente nas camadas exteriores que estão em contacto com o material das paredes do molde. Estas camadas exteriores ao solidificarem muito rapidamente criam tensões residuais que se refletem posteriormente em deformação.

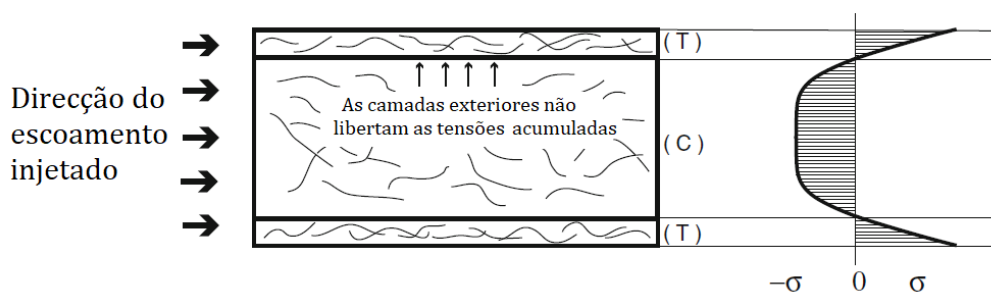


Figura 2.1: Esquema de um escoamento e representação das tensões residuais criadas no escoamento (adaptado de [2])

Ainda assim este fenómeno contribui em média uma ordem de grandeza abaixo do fenómeno de arrefecimento assimétrico. Isto é, caso o artigo injetado mantenha pontos quentes durante o arrefecimento, estes vão criar tensões residuais entre as porções em temperaturas menores e se a localização destas tensões for assimétrica então poder-se-á estar perante uma situação de empeno como se verifica na figura 2.2 [2].

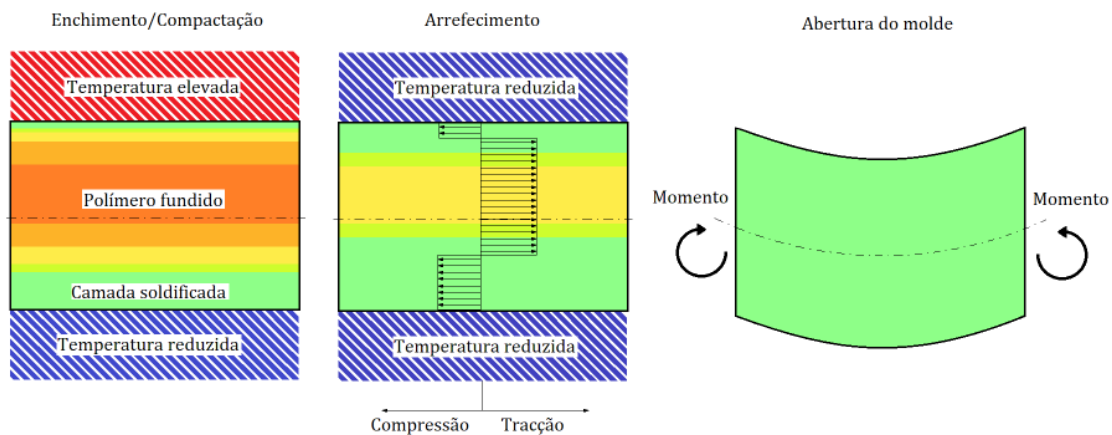


Figura 2.2: Esquema do fenómeno de arrefecimento causador de deformações geométricas

Como no mercado os desafios são cada vez mais exigentes, e os métodos analíticos demonstram-se inadequados para situações complexas, existem hoje meios para simular numericamente os fenómenos ocorrentes no interior dos moldes. O *Moldflow Insight* é um exemplo desta tecnologia que se tem estabelecido na indústria ao longo dos anos e tenho ganho um papel preponderante num grande número de empresas internacionalmente e em Portugal [3].

Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores atuais o uso deste tipo de ferramentas passa a ser bastante mais acessível ainda que o custo do simulador e uma pessoa especializada seja significativo. Na conjuntura atual verifica-se que existe um retorno do investimento para uma empresa que use este tipo de ferramentas. Estas podem garantir uma redução grande de custos na medida em que se previnem testes de moldes que de outra forma teriam de ser efetuados acrescentando custos ao produtor desta ferramenta. Logo justifica-se o uso de um simulador como *Moldflow Insight* para empresas que verifiquem uma produção anual significativa.

Estes tipos de simuladores requerem um uso atento e um acompanhamento da produção, especialmente aquando a injeção para garantir a fiabilidade dos resultados no entanto a indústria hoje tende a reconhecer o valor deste tipo de tecnologia tendo em vista a minimização de erros e consequentemente correções nas ferramentas[3].

É de ter em conta que o aumento da capacidade dos computadores atuais garante cada vez mais simulações rápidas que podem variar entre 5 minutos para uma análise de enchimento e compactação de uma peça simples até vários dias para um sistema bastante complexo, com vários milhões de elementos finitos e um estudo detalhado do

arrefecimento, enchimento, compactação e deformação. Tipicamente o tempo para uma simulação ronda 4 a 5 horas para um domínio com um milhão de elementos finitos.

Estes simuladores numéricos baseiam-se na discretização de um corpo, neste caso tri-dimensional, em domínios físicos de elementos finitos aos quais são atribuídas as propriedades características do corpo original. Com recurso a equações discretizadas, consoante o fenómeno em estudo, é calculado o fenómeno no interior de cada elemento e entre os vários elementos constituintes do domínio. Um exemplo de discretização é o escoamento de um polímero no interior de um canal circular que pode ser simulado pelas equações de *Navier-Stokes* e consegue prever o seu comportamento tendo em conta a sua viscosidade, que tem um papel especialmente importante em polímeros.

2.2 Estado da arte

2.2.1 Tecnologia de injeção

2.2.1.1 Molde

A tecnologia de injeção pertence à indústria dos polímeros e teve como início o ano de 1872 pelos irmãos *Hyatt* nos Estados Unidos da América. Teve a sua maior evolução nas décadas de 40 e 50 aquando a criação da máquina hidráulica para a injeção do polímero e posteriormente na década de 80 com a adaptação para uma máquina elétrica. As aplicações desta indústria são transversais em inúmeras áreas de consumo e engenharia. Esta tecnologia é particularmente vantajosa na sua versatilidade nas geometrias e materiais e cadência de produção.

Para a materialização duma peça injetada são necessárias 3 etapas principais enunciadas no subcapítulo 2.1. A etapa intermédia é o fabrico do molde e este é o principal responsável pela correta materialização do produto final.

O molde é uma ferramenta que consiste numa estrutura em que no seu interior se encontra uma ou mais cavidades com a geometria da peça final. Este é composto por vários órgãos constitutivos principais:

- Sistema de injeção
- Sistema de extração
- Sistema de arrefecimento
- Sistema de alimentação
- Zonas moldantes

Esta divisão de órgãos está interligada entre si no entanto pode-se ser discretizada como acima. Pode-se dizer que um molde tem 2 lados distintos: Lado da injeção e lado da extração devido à sua montagem na máquina injetora e tal como os nomes indicam cada lado é responsável pela injeção e extração. Os dois lados são separados pelo plano de separação ou união. O lado da injeção está tipicamente fixo e o lado da extração é

tipicamente móvel. Na figura 2.3 está representado um exemplo de um molde e observa-se que do lado da injeção tipicamente se encontra a cavidade e no lado da extração se encontra a bucha.

O molde hoje em dia está regularmente permeado de furações para canais de arrefecimento onde normalmente circula água e portanto na gíria ,estes canais denominam-se águas. Estes pretendem regularizar a temperatura das chapas da ferramenta para uma temperatura adequada à extração do produto final. Existem vários tipos de arrefecimento vigentes na indústria que recorrem a geometrias como palhetas, cascatas e pinos térmicos. A principal preocupação será a homogeneização das superfícies que entram em contacto com o material injetado. O dimensionamento correto destes sistemas de arrefecimento é preponderante para evitar fenómenos de empeno mencionados no subcapítulo 2.1.

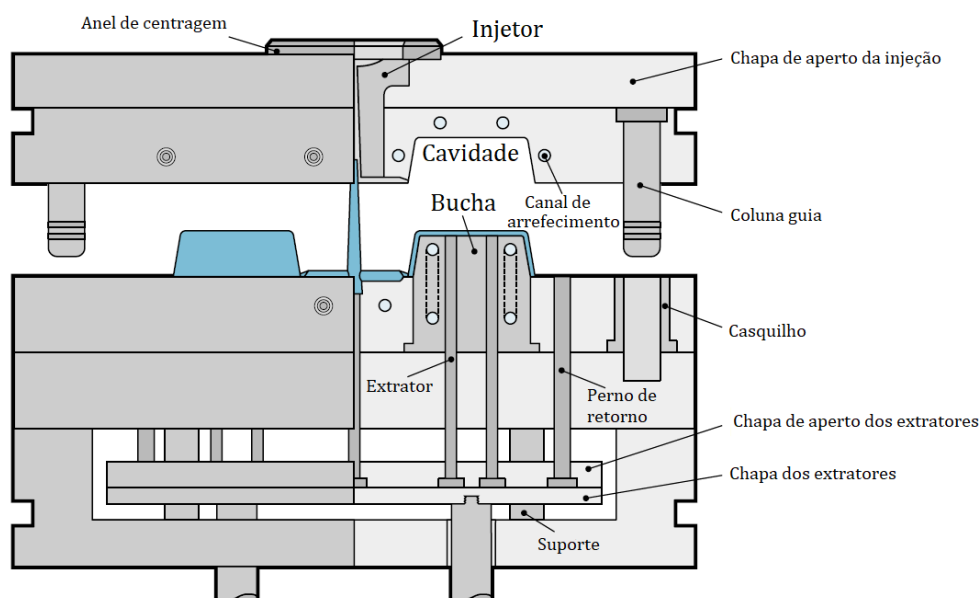


Figura 2.3: Esquema de um molde de canais frios de duas cavidades (adaptado de [4])

O sistema de alimentação, conhecido na gíria como ramais, é o responsável pelo guiamento do material injetado para as zonas moldantes. Este carece de um dimensionamento que tem em conta fatores como facilidade de escoamento, secção resistente para quebra no ataque, material desperdiçado entre outros. A complexidade deste sistema depende bastante do número de cavidades visto que é conveniente que todas as cavidades sejam preenchidas em simultâneo. Uma parte constituinte deste sistema é o ataque. O ataque é a secção pela qual o material passa para entrar nas zonas moldantes e a geometria deste afeta a forma como a cavidade é preenchida. Um mau preenchimento num molde pode resultar em degradação de material, peças incompletas, falta de compactação entre outras.

Finalmente tem-se o sistema das zonas moldantes que se caracterizam pela geometria inversa da impressão final pretendida. Este sistema é o núcleo do molde e como dito anteriormente é necessário homogeneizar termicamente as suas superfícies para uma moldação correta. Usualmente o material destes componentes são aços ferramenta, com

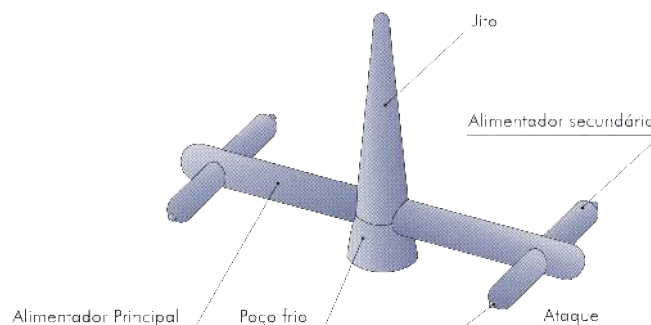


Figura 2.4: Esquema de um sistema de canais de alimentação de quatro cavidades (adaptado de [5])

elementos de liga que lhes garantem boa estabilidade geométrica face às flutuações térmicas e/ou ambientes corrosivos e abrasivos.

É possível discretizar o molde noutros sistemas que também têm papéis preponderantes como o sistema de escape de gases, sistema de guiamento e sistema de travamento. O primeiro é especialmente tido em atenção devido aos problemas que advêm de escapes mal efetuados nomeadamente de material oxidado. Os sistemas de guiamento e travamento são responsáveis pelo correto alinhamento das várias chapas do molde para que este consiga garantir tolerâncias geométricas por vezes muito conservadoras.

Estes sistemas indicam os fatores comuns na tecnologia de injeção plástica no entanto existem muitas variantes que distinguem os vários moldes. Estes elementos são:

Número de cavidades - num plano ou por andares (*sandwich*)

Canais - frios e quentes

Número de placas - duas ou três

Desenroscamentos - com movimentos helicoidais

Bi-Material - injeção de dois materiais distintos para a mesma impressão

Extração - mecânica, hidráulica ou com ar

Movimentos - movimentos acessórios para geometrias com *undercuts*

O **número de cavidades** diferencia a complexidade do molde no que diz respeito ao balanceamento do enchimento e arrefecimento do molde.

Quanto à tipologia de **canais** podem-se dividir em 2 grupos distintos. Os canais frios são ramais inscritos no aço sem qualquer mecanismo acessório em que existe desperdício do material dos ramais e canais quentes são ramais que são aquecidos por um carburador e destinam-se a poupar o material injetado.

O **número de placas** indica se o molde consegue ou não separar o material dos ramais aquando a abertura do molde. Isto é, um molde simples de duas placas, ao efetuar a

extração da moldação tem como produto a impressão mais os respetivos ramais enquanto que um molde de 3 placas faz a separação de ramais e jito dos artigos.

Para artigos com **geometrias helicoidais** como roscas, necessita-se de um tipo de molde equipado com uma cremalheira responsável pela rotação da bucha com o intuito de desmoldar a peça conservando a sua integridade.

Os moldes **bi-material** também apelidados de moldes rotativos são usados para aplicações em que é necessário o uso de dois materiais distintos no mesmo artigo. Tipicamente usam-se em peças que combinam estruturas em polímeros rígidos com partes em borracha ou o mesmo polímero com cores distintas.

A **extração** pode ser efetuada mecanicamente, com recurso a atuadores pneumáticos ou atuadores hidráulicos. O método mais frequente é a extração mecânica através de elementos extratores como pernos. Os atuadores usam-se em moldes com impressões de geometria complexa onde existem *undercuts* e é necessário ocorrerem movimentos no lado estático do molde ou seja no lado da injeção.

Os **movimentos** referem-se a moldes que necessitam de recorrer a chapas acessórias com movimentos à abertura do molde devido a geometrias negativas (*undercuts*).

Nesta dissertação vão ser abordadas peças injetadas com moldes de 3 placas e canais frios. Observa-se na figura 2.5 o funcionamento de um molde deste tipo. Primeiramente o molde é injetado e abre no plano de separação seguido de um arrasto placa b pelo elemento de abertura. Ao fasear estas etapas os ramais são separados no ataque dos artigos injetados devido à abertura do molde. Finalmente os pernos de extração, através de uma ação mecânica, retiram o material injetado do molde depois da separação. O material composto pelos jitos e canais de alimentação são reciclados no fim do processo.

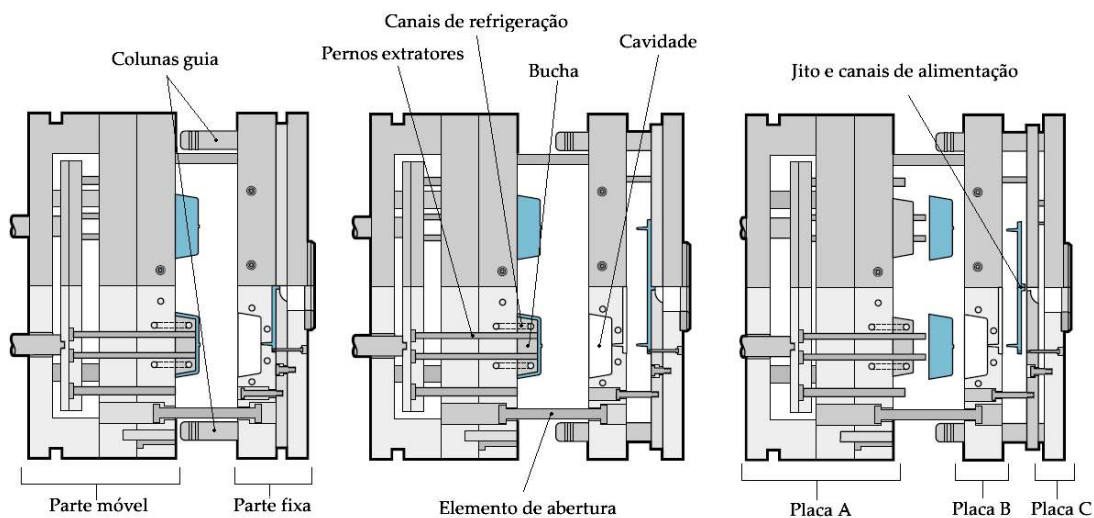


Figura 2.5: Fases de abertura de um molde de 3 placas (adaptado de [4])

2.2.1.2 Máquina injetora

A máquina injetora é responsável pela introdução do material no interior do molde e controlo dos respetivos parâmetros inerentes ao processo. A máquina é composta por várias unidades distintas que funcionam síncronas. Estas unidades são

Unidade de injeção composta por um cilindro com um fuso no interior e bandas de aquecimento no exterior. Unidade que desempenha a função mais preponderante na plasticização do material e exerceção de pressão;

Unidade de potência responsável pelo abastecimento de todos os atuadores;

Unidade de fecho que tem como função abrir e fechar o molde e garantir que este não ceda perante a pressão exercida na injeção. Pode ser composta por um atuador hidráulico, elétrico ou híbrido;

Molde que embora não pertença à máquina injetora em si desempenha um papel fulcral no processo.

Unidade de controlo que tem como principal função controlar pressões, temperaturas, rotação do fuso, perfil de injeção entre outros.

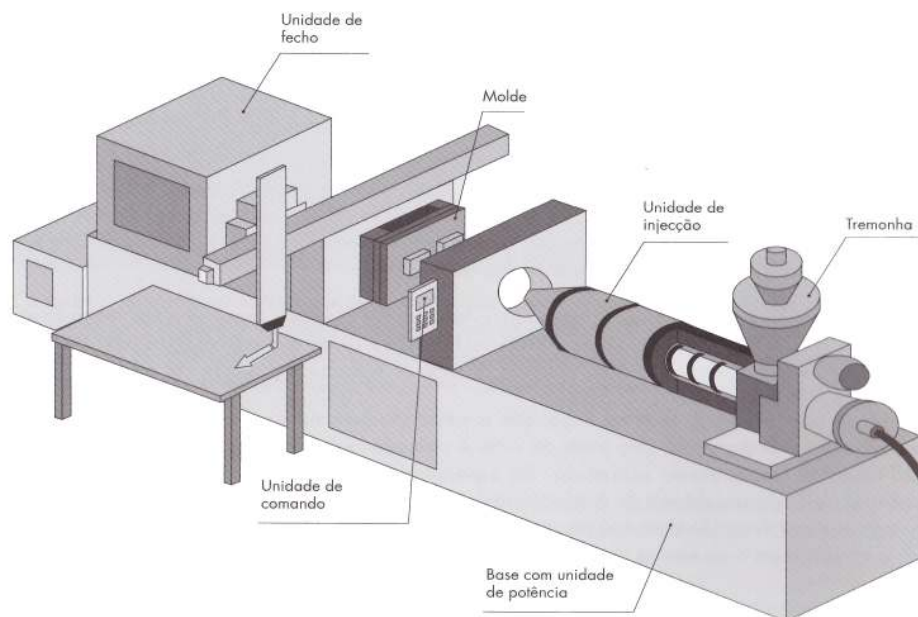


Figura 2.6: Esquema das unidades de uma máquina injetora com fuso rotativo (adaptado de [5])

O processo de injeção é cíclico e pode ser discretizado em várias etapas como na figura 2.7. Começando pela etapa do fecho do molde tem-se tipicamente duas partes que convergem o mais rápido possível sem danificar os equipamentos visto que esta fase é um tempo "morto". Em simultâneo o polímero está a ser alimentado pela tremonha ao cilindro enquanto o fuso no interior está em rotação. Com auxílio das bandas de aquecimento em

torno do cilindro o material é fundido e homogeneizado. Segue-se a injeção do material através do movimento de translação linear do fuso que obriga o material a entrar no molde. Nesta fase é particularmente importante estudar o melhor perfil de injeção possível, isto é, qual o que injeta mais rapidamente sem causar qualquer transtorno nas moldações. Este tipo de parametrização varia consoante a máquina usada no entanto é tipicamente controlada através da pressão ou velocidade do fuso por distância percorrida ou tempo. Entra depois uma fase essencial para um bom rigor geométrico que se denomina de pressurização ou compactação. Esta fase começa depois do ponto de comutação onde se efetua a transição do controlo de injeção para o controlo de pressurização. Durante alguns instantes o fuso exerce pressão sobre o material para garantir que as zonas moldantes estão preenchidas e haja o menor empeno possível. Com o arrefecimento da peça, a pressão é retirada com o recuo do fuso e este toma um movimento de rotação novamente para plasticizar o novo lote de material fundido. Durante as fases de pressurização as moldações já se encontram a arrefecer até se encontrarem numa temperatura à qual podem ser extraídas da ferramenta. Logo o molde abre e os extractores passados breves instantes atuam e removem os artigos. Quanto ao tempo de pausa pode variar bastante consoante o operador e molde no entanto tende a ser o mínimo possível.

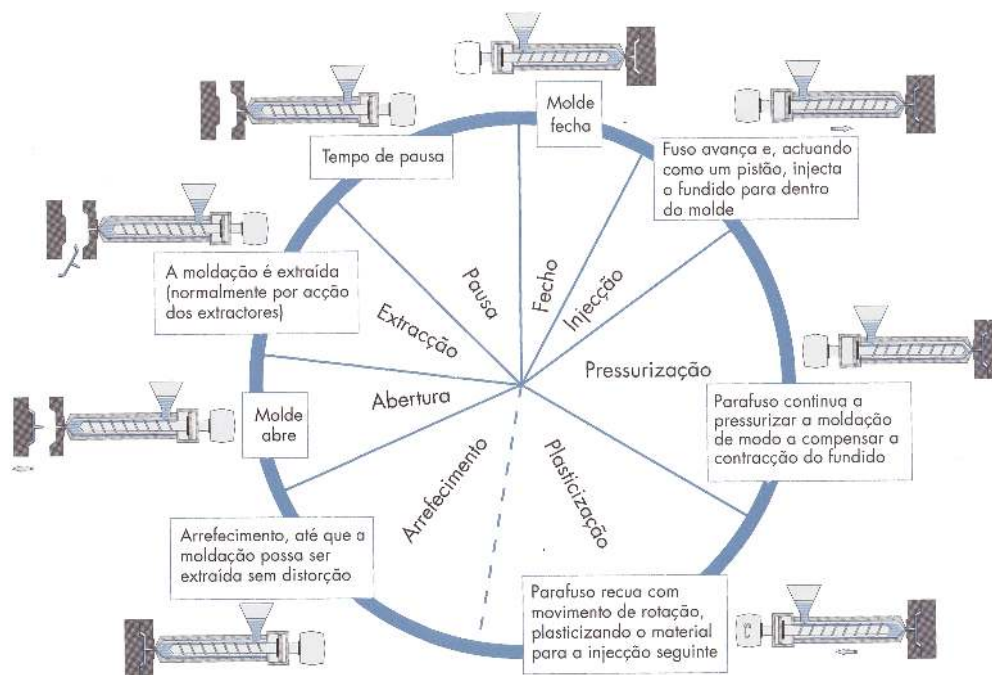


Figura 2.7: Fases de um ciclo de injeção (adaptado de [5])

Existem outros tipos de máquinas injetoras em que o fuso não desempenha o papel de atuador linear para exercer a pressão na injeção e compactação. Para moldes de pequenas dimensões é normalmente usado máquina com um pistão que é o responsável pela pressão efetuada enquanto que o fuso rotativo não exerce qualquer pressão e serve apenas para plasticizar o material. Este equipamento é usado visto que o volume injetado

em cada moldação é pequeno e a máquina tem de ter um controlo apurado conseguido pelo mecanismo do pistão. É particularmente importante para os micro-moldes em que o volume injetado é muito reduzido e uma máquina típica de fuso com atuação linear poderia não conseguir garantir consistência nos resultados tornando o processo pouco robusto [6].

2.2.1.3 Materiais Termoplásticos

Os materiais termoplásticos, tal como a tecnologia dos moldes e máquinas injetoras, tiveram o seu desenvolvimento após a segunda grande guerra na década de 40 e 50. Desde então o seu desenvolvimento tem aumentado e hoje são usados em inúmeras aplicações.

Estes materiais tem, na generalidade, um processamento fácil e rápido e são na sua maioria facilmente recicláveis ainda que na prática não haja a consciencialização devida por parte da população em geral acerca deste aspeto.

Embora exista uma grande variedade de polímeros com características distintas existem fatores comuns. Caracterizam-se por cadeias moleculares longas onde se verificam deslizamentos entre cadeias onde as ligações não são fortes mediante a ação térmica. No entanto as cadeias individualmente apresentam características elásticas de um sólido ideal. A este tipo de fenómenos dá-se o nome de viscoelasticidade.

A cristalinidade do material é um fator preponderante nas propriedades mecânicas e químicas do material. Com um aumento na cristalinidade o material aumenta a sua densidade, resiliência, temperatura de distorção e resistência a solventes. Provoca também uma diminuição da permeabilidade de gases e diminuição da resistência ao impacto.

A temperatura faz variar a interação molecular das cadeias dos polímeros e existem vários patamares comuns num grande número de materiais. Denota-se a importância de 3 temperaturas distintas que revelam grande importância: temperatura de **transição vítrea**, temperatura de **fusão** e temperatura de **degradação**. A temperatura de transição vítrea está associada a cadeias moleculares amorfas e é a temperatura na qual a mobilidade das mesmas aumenta drasticamente e o material entra num estado viscoso. Na temperatura de fusão regista-se uma desagregação das estruturas cristalinas observando-se uma mudança de estado. Esta última característica revela-se apenas em materiais semicristalinos ou de cristais líquidos. Na figura 2.8 observa-se a variação do volume com a temperatura e verifica-se, que para materiais mais cristalinos, existe uma mudança de estado clara quando comparados com materiais amorfos. A temperatura de degradação é o patamar a partir do qual o material passa a perder as suas características irreversivelmente na presença de oxigénio e um tempo de exposição prolongado. Nestas condições o polímero é oxidado e liberta gases perdendo parte da sua massa.

Na sua maioria os materiais termoplásticos são reofluidificantes no seu estado líquido o que significa que quanto maior a taxa de corte no seu escoamento maior tende a ser tensão de corte. Este comportamento difere de um fluido newtoniano, como se vê na figura 2.9, como a água. A água varia linearmente a tensão de corte com a taxa de corte.

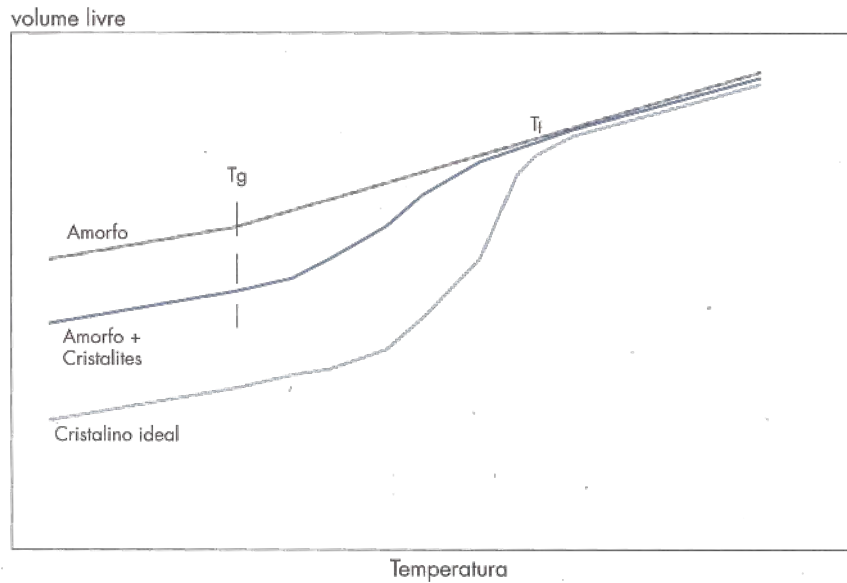


Figura 2.8: Variação do volume com a temperatura para polímeros de estruturas distintas (adaptado de [5])

Verifica-se também que a viscosidade é fortemente reduzida pelo aumento da taxa de corte e temperatura como observado na figura 2.10.

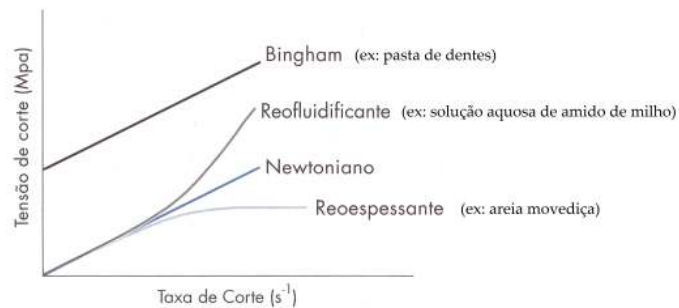


Figura 2.9: Comportamento reológico de diversos tipos de fluídos (adaptado de [5])

Comercialmente existe uma categorização distinta que separa os polímeros em categorias expostas na figura 2.11. Os materiais de grande consumo são, tal como o nome indica, os mais comuns pela facilidade de processamento e pelo preço baixo relativamente aos seus pares com propriedades refinadas. São frequentemente usados no setor das embalagens, construção civil, automóvel e utilidades. Os termoplásticos de engenharia prezam por características como maiores tenacidades e rigidez e aspetos superficiais melhorados. As temperaturas de processamento aumentam significativamente o que implica um maior gasto energético. Estes tipicamente requerem um processamento cuidado e ajuste de condições de processo. Os materiais de elevado desempenho exibem características mecânicas e térmicas excelentes e necessitam de temperaturas de serviço bastante elevadas podendo chegar a 300°C. Estes materiais requerem também cuidados acrescidos no

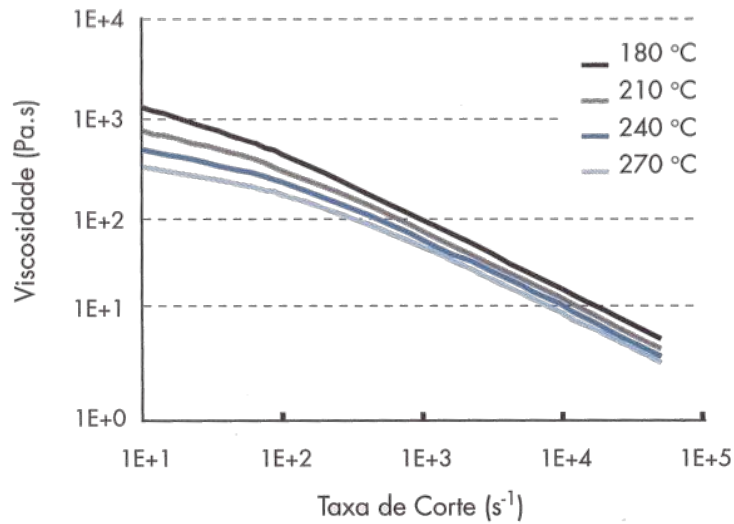


Figura 2.10: Curva de fluxo típica de um termoplástico (adaptado de [5])

processamento e suas condições não só devido às suas características mas também devido ao seu preço que pode chegar a centenas de vezes o valor de um material de grande consumo [5].

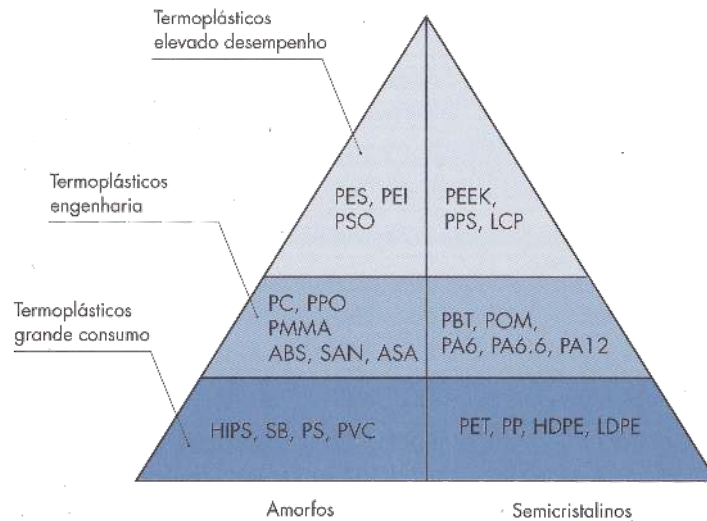


Figura 2.11: Classificação comercial de termoplásticos (adaptado de [5])

Existem outros polímeros que não se enquadram no esquema da figura 2.11 devido à sua aplicação particular como é o caso de materiais condutores e biodegradáveis.

Hoje em dia são também usadas vários tipos de misturas entre polímeros e misturas de polímeros com materiais como fibras carbono e metais em suspensão. Nestes casos as fibras pretendem garantir maior rigidez das estruturas ou propriedades metálicas como condução elétrica ou térmica.

2.2.2 Simulação numérica de injeção de polímeros

Como referido no subcapítulo 2.1 a simulação numérica é cada vez mais utilizada na indústria da injeção de polímeros. Esta enquadra-se no setor de *CAE* ou *Computer Assisted Engineering*. Este tipo de tecnologias começou por ser usado na década de 80 e inicialmente efetuava apenas previsões de enchimento. Hoje em dia o número de estudos possíveis é vasto sendo que os mais comuns são os testes de enchimento, compactação, empeno, arrefecimento, janela de moldação entre outros. A ordem de trabalhos típica de uma simulação está descrita na figura 2.12.

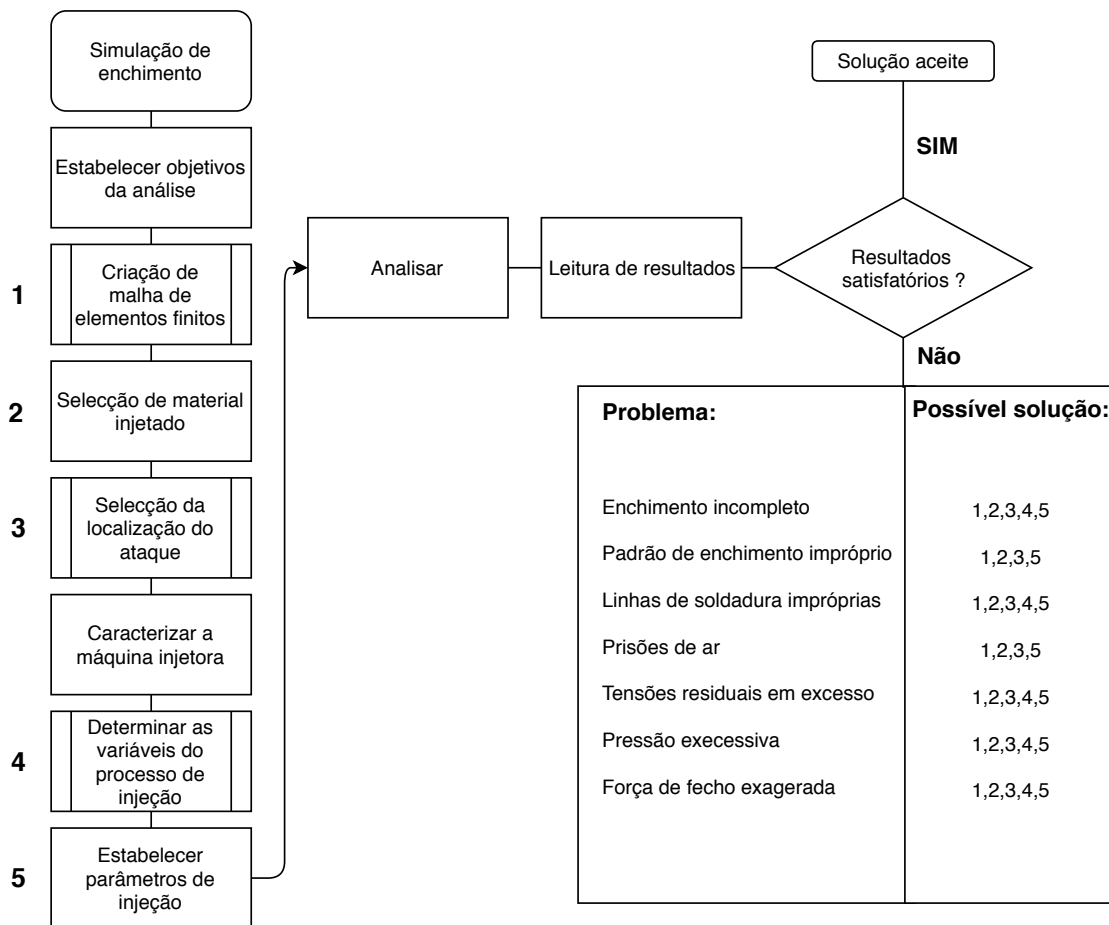


Figura 2.12: Fluxograma de uma análise de enchimento típica

Tipicamente recorria-se a este tipo de ferramentas para resolver problemas verificados depois da concretização do molde de modo a poupar tempo e investimento num maior número de testes e correções. Hoje os simuladores tomam um lugar preventivo aquando o projeto e materialização do molde.

Ainda que tenha existido um grande progresso ao nível da simulação, esta ainda depende bastante do uso correto do operador. Para um resultado preciso dos fenómenos ocorrentes nos moldes é necessário uma parametrização muito atenta no que diz respeito às malhas de elementos finitos e à forma como se emulam as variáveis do processo de

injeção. Estão a ser desenvolvidos e já existem no mercado algoritmos capazes de automatizar a criação de malhas de elementos finitos sem uma parametrização detalhada como é o exemplo do *Moldflow Adviser*. Este simulador pretende ser uma versão *light* da versão *Insight* usada nesta dissertação no entanto existem perspetivas para integrar esta funcionalidade na última versão.

Empresas como a Autodesk e Moldex3D já fornecem serviços para computação em *Cloud* o que pode significar uma alteração paradigmática com vista à indústria 4.0. Com esta alteração paradigmática já é possível um menor investimento, por parte dos utilizadores, em computadores de alta performance visto que o cálculo pode ser efetuado num *cluster* de computadores e desta forma democratizar o uso deste tipo de ferramentas.

Encontra-se já no mercado uma forma de análise pelo cálculo numérico em que o utilizador não necessita de criar qualquer malha e qualquer alteração geométrica (*Moldflow Adviser*) efetuada demonstra resultados em tempo real (*Ansys discovery live*). Se esta metodologia for acessível é provável que o seu uso se aplique na indústria da injeção de polímeros visto que a obtenção de resultados quase instantâneos torna-se bastante benéfica para os problemas comuns que surgem visto que é possível testar inúmeras variações geométricas num curto espaço de tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Família de peças

Esta dissertação incide sobre um conjunto de rodas dentadas com geometrias variadas. Podem dividir-se em dois grupos distintos que se diferenciam pelo tipo de molde utilizado para o seu fabrico. Isto é, uma pequena porção de peças recorre a movimentos perpendiculares ao movimento de abertura para faces do artigo injetado que de outra forma seriam inacessíveis. Na figura 3.1 observam-se exemplos dos vários tipos de rodas e em (d) vê-se o tipo de artigos que necessitam das ferramentas com movimentos adicionais.

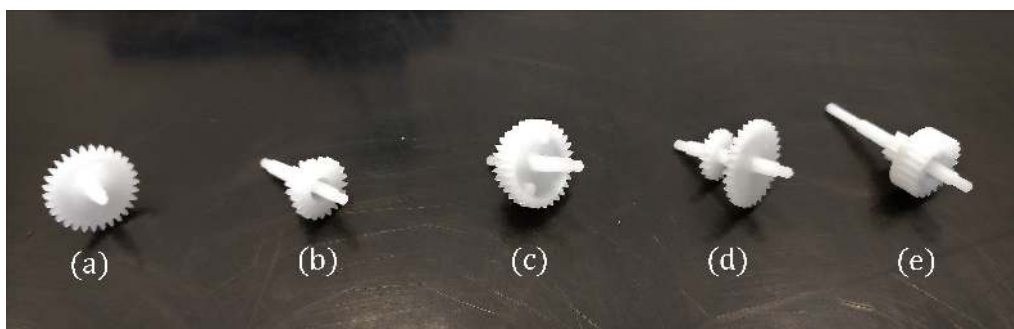


Figura 3.1: Diferentes tipos de formas de rodas dentadas

Todas as peças deste conjunto são peças de revolução que giram em torno de um veio. As dimensões deste veio são iguais para todo o conjunto bem como as dimensões dos dentes das rodas dentadas. Na figura 3.2 apresenta-se um exemplo de uma zona moldante composta por várias chapas onde se encontram os inserts. Estes são responsáveis pelas componentes distintas de cada peça, isto é, das rodas dentadas e nervuras características de cada combinação. São amovíveis, logo um molde consegue efetuar a injeção de várias

combinações distintas dependendo dos insertos colocados.

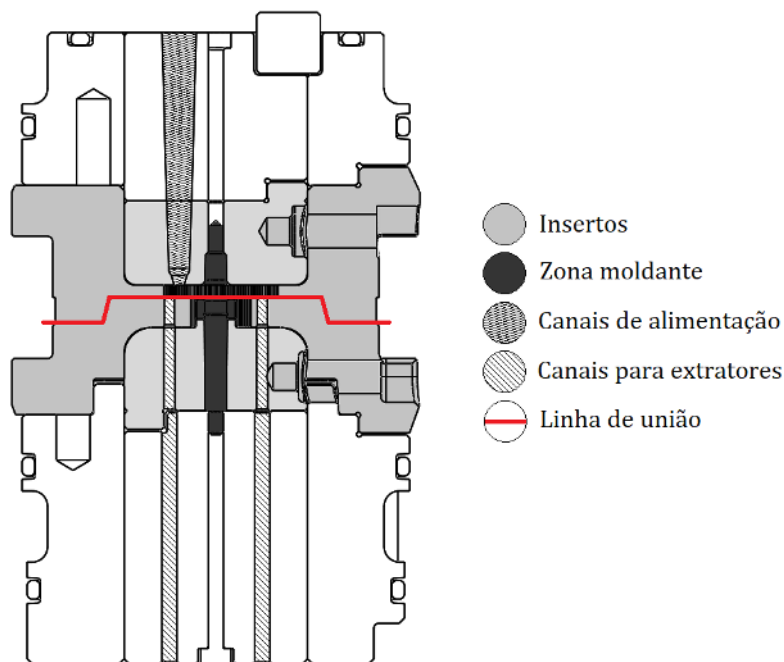


Figura 3.2: Vista de corte de uma zona moldante exemplo

Na generalidade o ataque é localizado lateralmente numa das rodas dentadas como apresentado na figura 3.2. A grande distinção entre as várias combinações reside nas variações de secção causadas pelas rodas dentadas.

3.2 Polióximetileno

3.2.1 Descrição de Polióximetileno

O polióxidometileno, também conhecido por poliacetal é um polímero comumente usado na indústria e pertence à categoria de termoplásticos de engenharia semicristalinos [5]. É um polímero bastante usado na indústria da injeção plástica devido às suas características de alta estabilidade geométrica e resistência à abrasão e ambientes hostis como temperaturas constantes acima de 60° Celsius até aproximadamente 100° Celsius e ambientes alcalinos.

O termo termoplástico refere-se a uma categoria de polímeros que apresentam uma fusão e diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura. Estes ao contrário dos polímeros termoendurecíveis consegue ser novamente fundido e moldado. Dentro dos termoplásticos existem materiais amorfos e semicristalinos. Os últimos são conhecidos por, na generalidade, terem um maior módulo de elasticidade e maior tenacidade e dureza que os polímeros amorfos. Na figura 3.3 observa-se as estruturas das cadeias moleculares de um material semicristalino com as suas fases amorfas e cristalinas . A

maior organização molecular nos materiais semicristalinos garante-lhes as propriedades enunciadas acima [5].

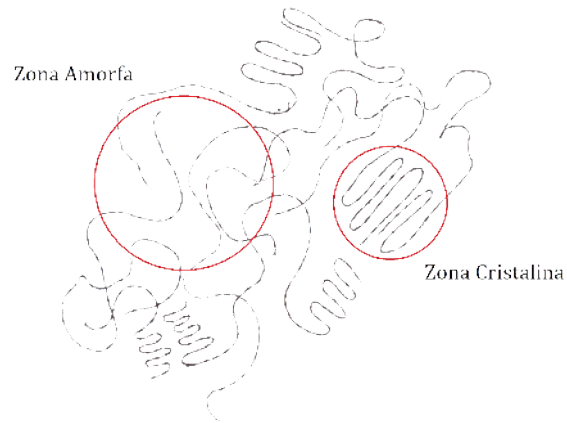


Figura 3.3: Representação da estrutura molecular de um polímero semicristalino (adaptado de [5])

Este material foi inicialmente concebido para substituir metais em variados tipos de aplicações pela empresa *DuPont* nos anos 50 e é conhecido no mercado como *Delrin plastic*. Inicialmente foi criado no seu estado de homopolímero e apenas na década de 60 foi alterado para um copolímero com maior durabilidade, resistência a exposição ultravioleta e a compostos orgânicos como combustíveis. Desta forma a empresa *Celanese* lançou no mercado o copolímero com o nome de *Hostaform® POM*. Este último é o material usado para a injeção das peças sobre as quais a dissertação incide [7] [8].

O *POM* é utilizado em inúmeras aplicações por vários motivos distintos sendo os principais peças móveis expostas a fenômenos de atrito como elementos deslizantes, temperaturas extremas, e estabilidade geométrica. Na figura 3.4 estão várias aplicações frequentes do polióxidometileno.



Figura 3.4: Exemplos de aplicações comuns do polímero *POM* (adaptado de [7])

O poliacetal utilizado na injeção da família de peças em estudo na dissertação é *Hostaform® POM C 9021*.

3.2.2 Propriedades do material

Nesta secção abordar-se-ão as características a ter em conta a escolha deste material pelo cliente para as peças injetadas e aspetos a ter em conta quanto ao seu uso em injeção.

Primeiramente tem de se ter em conta a temperatura de fusão do polímero que para o *POM* tem o valor de 166 °C. A partir deste ponto um aumento da temperatura baixa a sua viscosidade ajudando aquando a injeção do material na medida em que este preenche mais facilmente as lacunas da cavidade. Entre os 150 °C e 166°C o material apresenta um comportamento mesomorfo, isto é, apresenta características compreendidas entre um sólido e líquido. Desta forma a extração das peças dos moldes terá de se efetuar abaixo deste intervalo de temperaturas. Tem de se ter em conta também que o aumento da taxa de corte no escoamento diminui significativamente a sua viscosidade como se verifica na figura 3.5. Este aumento da taxa de corte é significativamente maior se a secção onde o material é escoado diminuir o que obriga a escoamentos com maiores gradientes de velocidades.

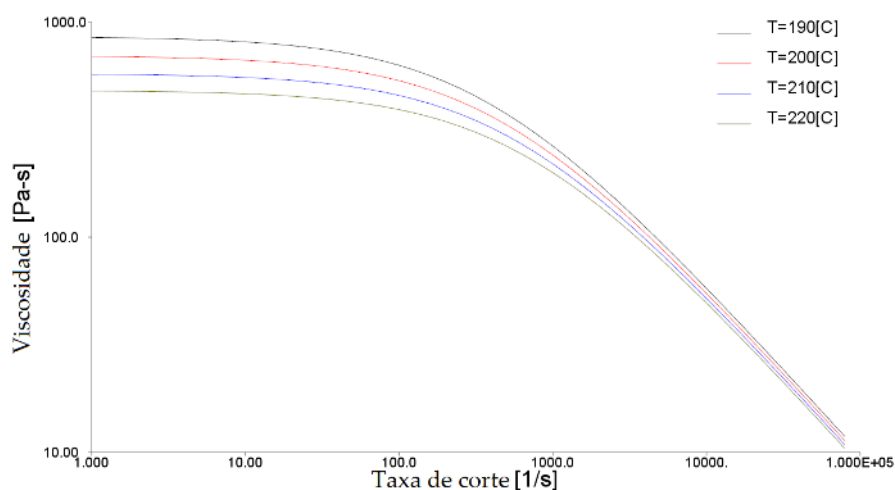


Figura 3.5: Variação da viscosidade do *Hostaform*® POM C 9021 pela temperatura e taxa de corte (retirado de Moldflow)

Como qualquer polímero semicristalino o seu comportamento com o aumento de temperatura e pressão não corresponde a um material amorfo. Na figura 3.6 está representado o gráfico PVT do material selecionado. Observa-se que o volume tem um taxa de crescimento elevada para valores próximos da sua temperatura de fusão e seguidamente para temperaturas maiores o comportamento torna-se linear crescente novamente. Este fenómeno dá-se devido a ao carácter cristalino do material. Como o material em temperaturas abaixo do ponto de transição vítrea (150 °C) é formado principalmente por cadeias cristalinas compactas e com ligações atómicas fortes este ocupa bastante menos espaço do que o mesmo material a uma temperatura superior. Isto é, ao aumentar a temperatura as cadeias cristalinas tendem a tornar-se amorfas e por consequência ocupar consideravelmente mais espaço [9] [10].

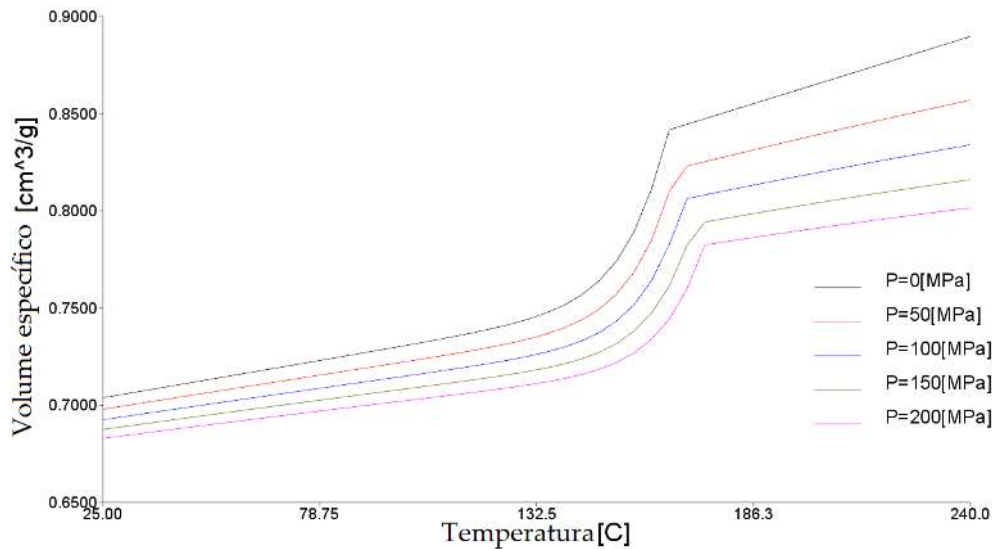


Figura 3.6: Variação da viscosidade do volume com a temperatura e pressão do *Hostaform® POM C 9021* (retirado de Moldflow)

Esta característica normalmente implica uma contração elevada quando comparada com alguns materiais amorfos mas também um aumento da dureza e resiliência do material bem como a sua estabilidade geométrica [9]. Em alguns materiais existe uma taxa de contração distinta entre as direções do escoamento, isto é na direção paralela ao escoamento e normal ao escoamento o que não se verifica neste material.

O POM distingue-se de outros polímeros pelo seu elevado desempenho tribológico. Isto é, pela sua capacidade de resistir a fricção e abrasão por outros materiais ou entre o mesmo material. Esta característica é dada pela organização estrutural dos cristais e pela linearidade das cadeias moleculares [7].

3.3 Quantificação do empeno e artigo para referência base

O artigo escolhido para o estudo desta dissertação é uma das peças do conjunto de combinações obtidas no molde 6203. Este artigo é caracterizado por um veio e duas rodas dentadas com geometrias distintas. O molde usado no fabrico deste artigo é um molde simples de três placas sem quaisquer movimentos nas zonas moldantes e de canais frios. Na figura 3.7 está representado o artigo acima indicado. O objetivo de tomar este artigo como referência é para efetuar variações geométricas e paramétricas e observar a resposta em relação a esta mesma referência base.

Esta dissertação incidirá na resposta geométrica do artigo injetado, mais concretamente no batimento radial medido. Desta forma torna-se imperativo utilizar métodos de medição eficazes e fiáveis.

De modo a sincronizar os fenómenos reais e simulados surge a necessidade de obter valores da mesma ordem de grandeza, entre a simulação e as peças injetadas, de modo a

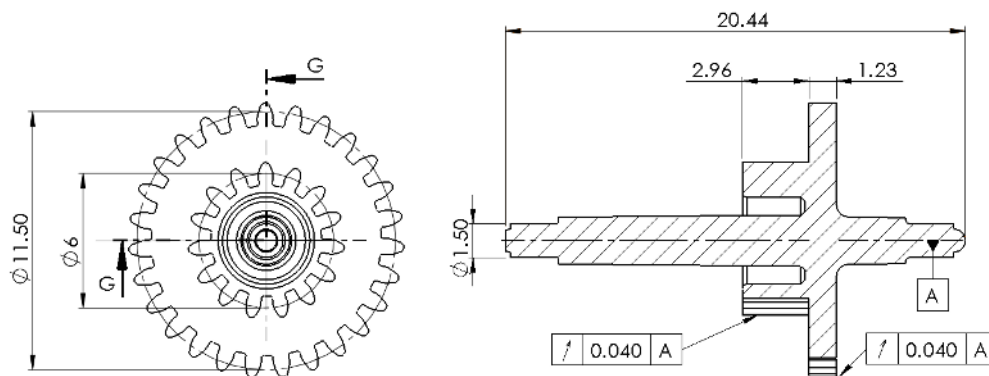


Figura 3.7: Desenho cotado do artigo de referência

verificar a sua credibilidade. Não é pretendido a validar o programa de cálculo *Moldflow Insight*, mas sim o ajuste das várias condições de simulação às condições reais.

Posto isto efetuou-se a medição dos artigos com o conjunto de equipamentos apresentados na figura 3.8. A peça de contacto é alterada consoante o diâmetro da roda a medir e é fixa na haste do comparador. Para a correta medição do batimento do artigo o cliente concebeu um suporte específico para o conjunto de peças pedido. Este suporte limita os movimentos de translação do artigo medido permitindo apenas a sua rotação em torno do eixo do veio. Ao rodar a peça ocorrem alterações na distância medida no relógio comparador que são prontamente registados.

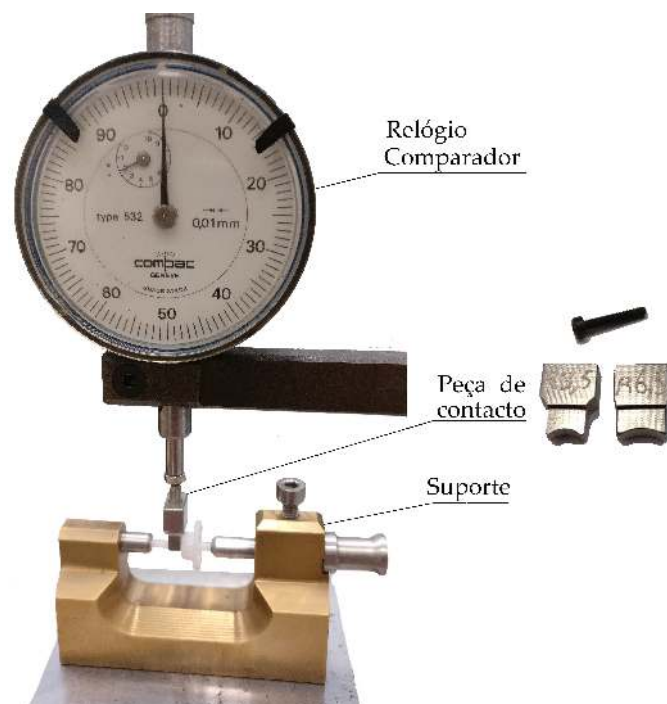


Figura 3.8: Montagem de equipamentos usada na medição dos artigos injetados

Como qualquer aparelho de medição analógico existe um erro associado na medição.

Na figura 3.8 observa-se que a menor divisão da escala é de uma centésima de milímetro. No entanto, como qualquer aparelho analógico, é possível estabelecer uma casa decimal de incerteza. Neste caso optar-se-á por metade da menor divisão da escala, ou seja, 0.005 milímetros.

Os resultados medidos no artigo de referência estão apresentados na figura 3.9.

Apresentam-se pontos medidos em 3 peças distintas e o respetivo valor médio. Observa-se que o valor médio de batimento medido é de 0.033 milímetros, ou seja, abaixo da tolerância imposta de 0.04 milímetros. É demonstrado pela dispersão de pontos um máximo em aproximadamente 180°. Isto é, se o máximo está localizado a aproximadamente 180° e consistentemente nas peças medidas então constata-se um padrão no empeno.

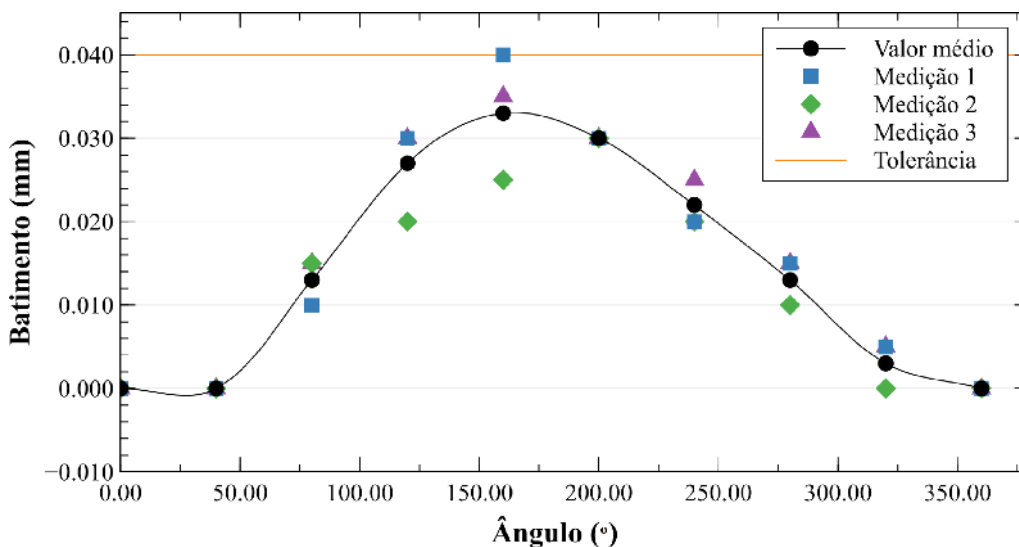


Figura 3.9: Medição do perfil de batimento do artigo de referência base

Quanto à medição do batimento no programa *Moldflow* é necessário elaborar um método consistente para todas as simulações. Posto isto recorre-se à recolha de coordenadas de pontos chave à medição do batimento. Na figura 3.10 (a) está representado o plano onde ocorre o desvio do artigo como verificado pelas medições anteriores. Visto que o ponto máximo e mínimo registado na rotação é medido neste plano então os pontos chave são os extremos dos apoios e os extremos das rodas dentadas mais próximas do plano. Como se observa na figura 3.10 (b), do lado do ataque, o dente está desfasado em aproximadamente 6.6° do plano. Por este motivo tem de se considerar as distâncias A e B identificadas na figura 3.10 (b).

Escolhidos os pontos chave para a medição do batimento são retiradas, do *Moldflow*, as coordenadas dos mesmos pontos, mas na peça deformada. Desta forma conseguem-se retirar os desvios obtidos pelas diferenças das coordenadas do objeto não deformado com o as coordenadas do objeto deformado. Com auxílio do *Solidworks* medem-se as distâncias A e B, indicadas acima, ao eixo da peça deformada e obtém-se o valor do batimento radial para a roda dentada em questão.

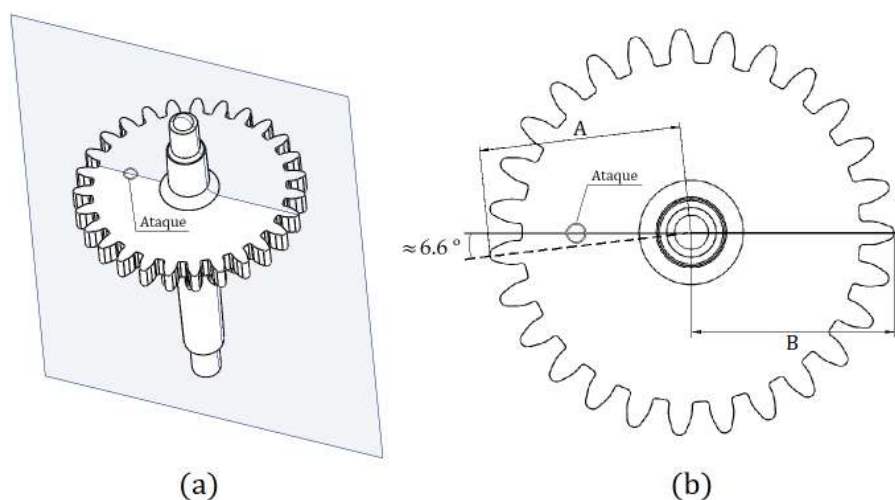


Figura 3.10: Plano onde ocorre o defeito (a) e locais escolhidos para a medição do batimento (b)

3.4 Simulação da injeção plástica

3.4.1 Moldflow Insight

Em vários ramos da engenharia existem programas capazes de simular fenomenologia real com o objetivo de prever quais os eventuais problemas e possíveis soluções para os mesmos. Na indústria da injeção plástica existem várias alternativas quanto a simuladores sendo que um dos mais utilizados é o *Moldflow Insight*.

Este simulador permite descrever a ferramenta de injeção (molde) com as suas várias características como geometria e material bem como o controlo das variáveis imputadas pela máquina injetora e o respetivo material injetado. O *Moldflow* permite perceber quais os fenómenos associados a cada geometria de molde diferente e desta forma prevenir possíveis erros construtivos na ferramenta ou no artigo.

O *Moldflow* tem várias funcionalidades quanto a tipos de simulações. Estas são as de enchimento do molde, as de arrefecimento, as de janela de moldação, as de otimização da localização do ataque e vários tipos de combinações entre estes. Na figura 3.11 está o menu respetivo com as várias possibilidades. A configuração mais completa da sequência de simulações e que possibilita uma resposta idêntica à real é primeiramente arrefecimento, depois enchimento, compactação, e empeno. A janela de moldação e otimização do local do ataque são utilizadas numa fase preliminar do projeto do molde onde ainda não existem tantos constrangimentos na construção da ferramenta. No decorrer da dissertação pretende-se usar a configuração da sequência acima enunciada.

Consegue-se escolher o material injetado a partir da base de dados criada pela *AutoDesk*, alterar estes mesmos materiais caso não estejam totalmente definidos ou caso não se concorde com os mesmos. Permite também criar um material que não esteja na base de dados através das suas várias características normalmente fornecidas pelo fabricante.

Como qualquer simulador de fenómenos reais de engenharia existe discretização do

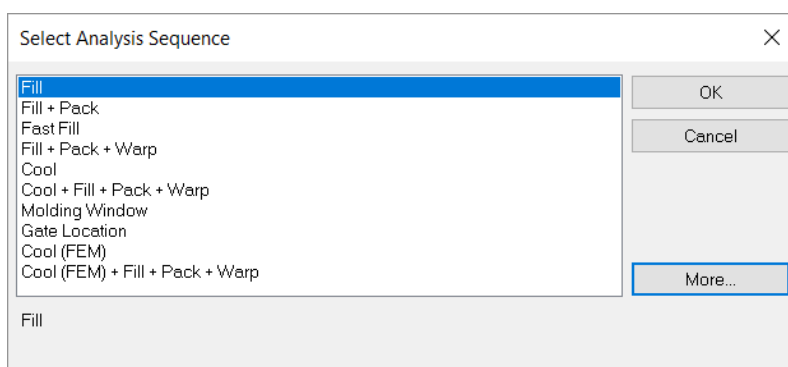


Figura 3.11: Menu apresentado pelo *Moldflow* para a escolha da sequência de simulações.

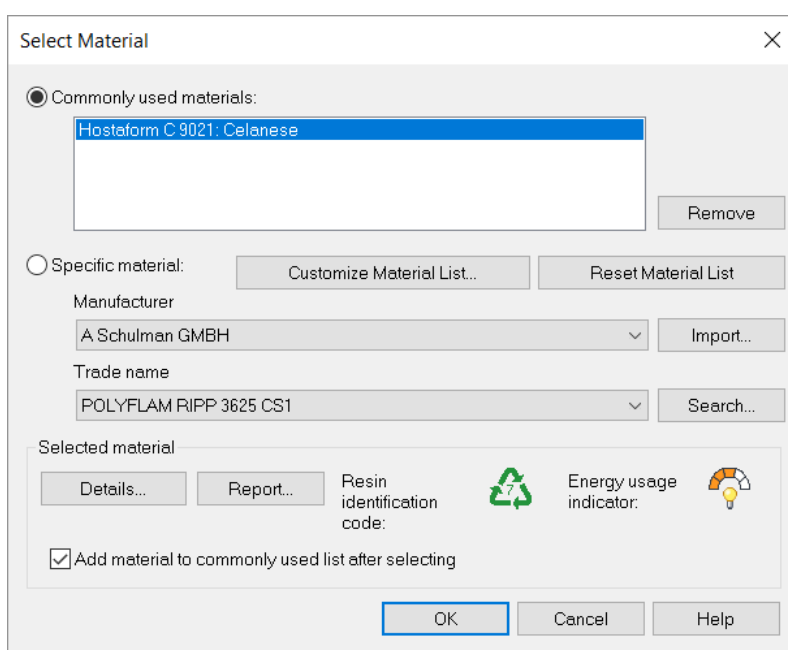


Figura 3.12: Menu para escolha do material na base de dados fornecida pela *AutoDesk*.

o sistema em estudo e portanto é necessário haver uma malha de elementos finitos. O programa permite a escolha entre 3 tipos de malha de elementos: *DualDomain*, *MidPlane* e *3D*. Na figura 3.13 estão apresentadas as malhas disponíveis no *Moldflow*. As duas primeiras são utilizadas para peças com geometrias de casca ou seja, com espessura pouco variável e permitem simplificar a simulação melhorando substancialmente os tempos de cálculo. A malha tridimensional é adequada para geometrias com bastantes variações de espessura e pelo elevado número de elementos finitos esta modalidade é bastante morosa no cálculo.

O tamanho dos elementos é um pormenor essencial para a correta parametrização de um corpo para que os fenómenos térmicos e mecânicos correspondam com um bom grau de fiabilidade à realidade.

Uma parte essencial do simulador é a parametrização das condições de injeção. Isto é adequar as variáveis de injeção ao sistema em estudo e se possível à máquina injetora

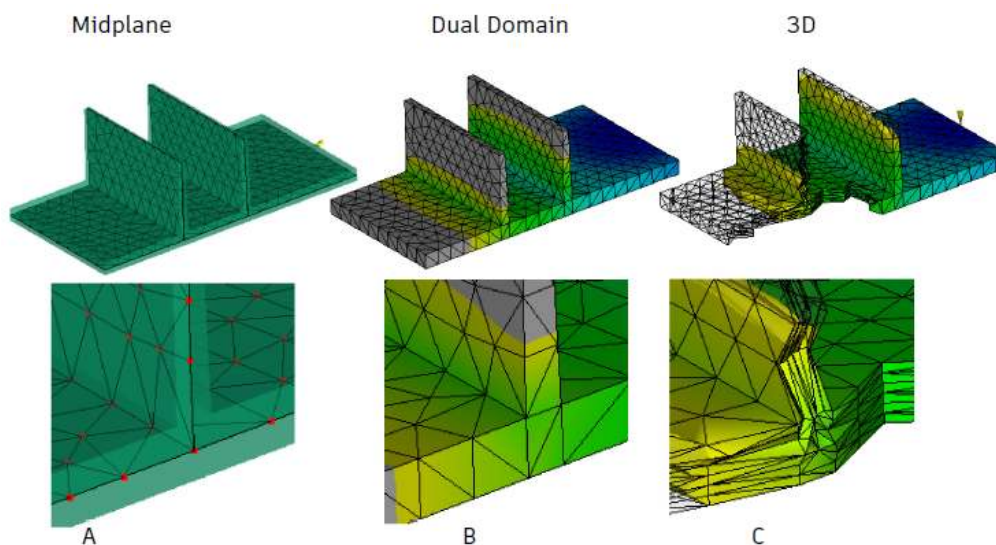


Figura 3.13: Tipos de malhas disponibilizadas pelo *Moldflow* (adaptado de [11])

que irá efetuar o processo. Desta forma o *Moldflow* permite controlar vários aspetos da injeção através de diferentes perspetivas. Por exemplo no estudo do enchimento pode-se introduzir como *input* um caudal, uma velocidade de avanço do fuso da máquina injetora ou um tempo de injeção. Assim é possível adequar a simulação à realidade encontrada na indústria visto que o controlo nas máquinas varia entre fabricantes.

Quanto os resultados o *Moldflow* apresenta inúmeros resultados nos vários tipos de simulação como previsão de enchimento temperaturas e pressões associadas ao longo do tempo, tensões superficiais, transferências de calor, taxa de contração, magnitude de empeno entre muitos outros.

O uso correto deste tipo de ferramentas é estritamente necessário devido ao elevado número de variáveis envolvidas. Para o uso correto deste programa existe uma necessidade de aprofundada do funcionamento do molde em estudo bem como da tecnologia de injeção. Isto é, um uso correto do simulador pressupõe um contacto prévio com a tecnologia de injeção de modo a perceber quais as dificuldades dos operadores aquando a parametrização da máquina e injeção dos artigos. O correto uso da ferramenta passa também por saber adequar as malhas de elementos ao objeto de estudo. Isto é, para além de escolher qual a modalidade de malha é necessário adequar o número de elementos e camadas ao longo da espessura para fazer corresponder os fenómenos reais aos simulados.

3.4.2 Domínio computacional e discretização

A malha de elementos finitos é gerada pelo *Moldflow Insight* e apenas tem elementos triangulares e tetragonais. Para o estudo de artigos com grandes variações de espessura é aconselhado por parte do programa uma malha de elementos tridimensionais. Este tipo de malha distingue-se por ser mais fiel à geometria já que esta cria um grande número de elementos finitos. Deste modo o tempo de cálculo é bastante maior quando comparado

com malhas de elementos finitos bidimensionais. Caso se usasse uma malha de elementos triangulares poder-se-iam perder fenómenos ocorrentes em partes do artigo com grandes variações de secção.

Posto isto é necessário averiguar qual a quantidade de elementos necessária para uma simulação ser considerada suficientemente fiável. Logo procede-se a um estudo de independência de malha. O objetivo será refinar a malha até obter um erro inferior a 5% em valores consecutivos. Optar-se-á pela malha que respeitar a condição anterior para as simulações posteriores.

O parâmetro principal usado para definir a malha é o tamanho médio entre nós do mesmo elemento e é conhecido por *global edge length (g.e.l.)* pelo *Moldflow*. Para o estudo da independência de malha reduzir-se-á o tamanho de *g.e.l.* em simulações simples de enchimento e empeno excluindo o arrefecimento. As variáveis de processo adotadas para este estudo serão as utilizadas para os testes dos moldes das rodas dentadas.

Na figura 3.14 estão os resultados do batimento mediante a redução do *g.e.l.* bem como a progressão do tempo de simulação. Observa-se que para *g.e.l.*=0.25 mm os valores de batimento começam a estabilizar e esse é o primeiro valor que respeita a premissa de um erro menor que 5% em relação ao valor posterior. Verifica-se também que para dimensões inferiores de elemento o tempo de simulação aumenta substancialmente.

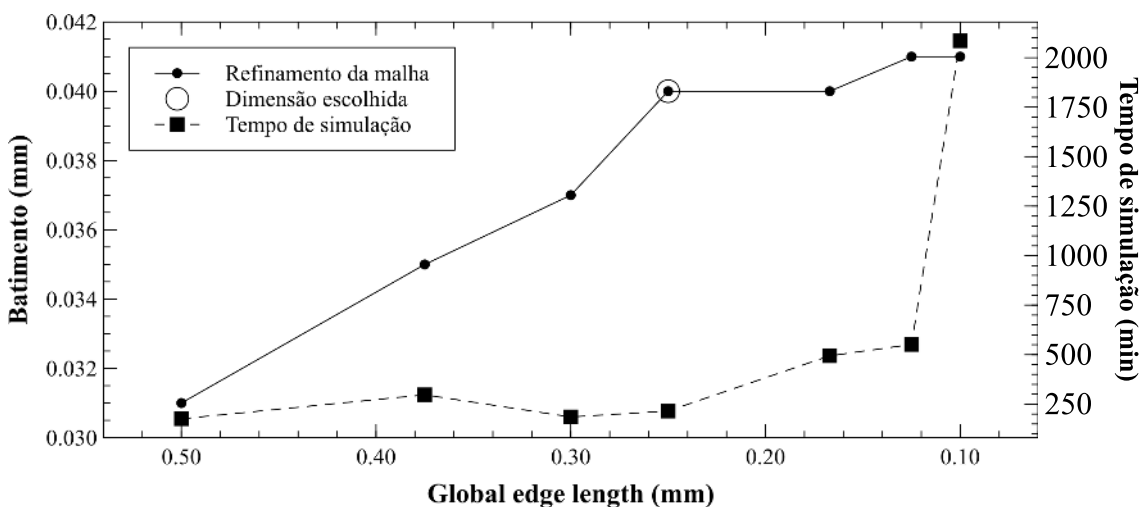


Figura 3.14: Variação do batimento e tempo de simulação com o tamanho de elementos finitos

Sabendo que a geometria do veio e apoios não é complexa, nestas parcelas do artigo foi aplica-do um *g.e.l.* de 0.5 milímetros e registou-se o valor do batimento. O valor registado foi de 0.039 milímetros de batimento o que indica que o erro associado tem o valor de 4.9%, ou seja, verifica ainda a condição acima. Desta forma a malha que se pretende usar nas simulações toma os valores *g.e.l.* de **0.25 mm** nas rodas dentadas e **0.50 mm** nos veios e apoios.

A simulação numérica, especificamente em malhas de elementos tridimensionais, requer uma grande capacidade de cálculo do processador e uma grande capacidade de

memória para alocar informação necessária à simulação. Desta forma é necessário parametrizar apenas os aspetos necessários a uma resposta do sistema a simular fidedigna. Desta forma procede-se primeiramente à inclusão de todos os órgãos funcionais da injeção e arrefecimento. Isto é, jito, canais de alimentação ou “ramais”, canais de refrigeração ou “águas” e zonas moldantes. Todos os órgãos restantes do molde não prestam uma influência direta no processo de injeção.

Na figura 3.15 está apresentada a configuração adotada inicialmente com duas cavidades. No entanto simular um grande número de experiências com a configuração (a) é bastante moroso. Logo pretende-se simplificar para apenas 1 cavidade com se vê na figura 3.15 (b). Antes de optar por esta simplificação é necessário averiguar se existe uma influência em simular 2 cavidades ou apenas 1 porque poderá ocorrer uma afetação térmica entre zonas moldantes. Se ocorrer esta afetação é possível que o defeito seja causado por este fenómeno. Desta forma efetuou-se uma simulação com apenas 1 cavidade e as mesmas variáveis operatórias de modo a comparar com as duas cavidades. O batimento registado para 1 cavidade foi 0.035 milímetros e para duas cavidades registou-se um batimento de 0.030. Logo parece existir afetação, mas favoravelmente para a resposta geométrica, ou seja, reduz-se o batimento. Proceceu-se à alteração do local de injeção para o lado oposto do veio ainda na mesma superfície e verificou-se que o batimento medido é 0.032. Logo a afetação térmica aparenta auxiliar o balanceamento das zonas moldantes e resulta num batimento menor. Por fim entende-se que se se usar apenas 1 cavidade então estar-se-á a majorar o defeito. Se este respeitar a tolerância imposta então no molde com 2 cavidades o batimento será menor.

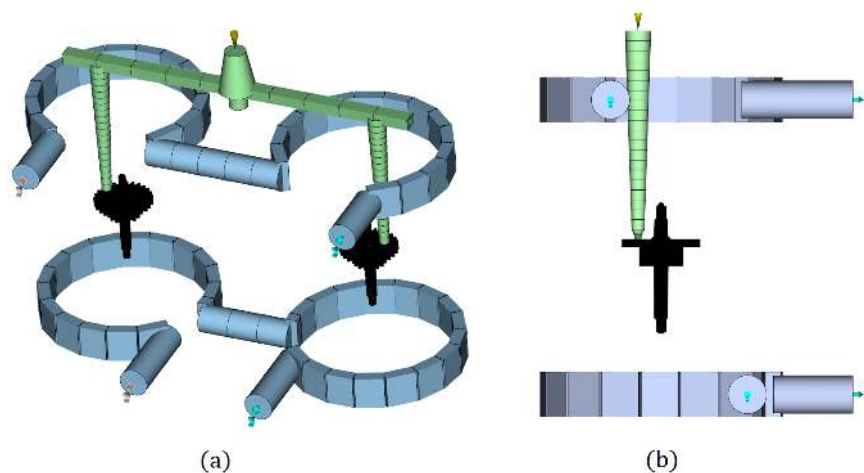


Figura 3.15: Configurações adotadas para a simulação. Inicial em (a) e simplificada em (b)

As variáveis do processo de injeção são fundamentais para a obtenção de um produto polimérico pretendido. Estas variáveis que podem ser parametrizadas no *Moldflow* de várias formas consoante o tipo de controlador usado na máquina injetora. A máquina injetora usada nos testes dos moldes da família de peças estudada nesta dissertação é

controlada pelo avanço do fuso, no entanto existem máquinas injetoras controladas por pressão no interior do cilindro.

Inicialmente a variável usada para parametrizar a injeção foi 0.18 segundos de duração de injeção registada pela máquina injetora. Ao efetuar as simulações com as variáveis descritas nos relatórios de teste, incluindo o tempo de injeção acima, obteve-se a resposta geométrica do artigo de referência. Neste resultado o batimento medido foi inferior a 0.005 mm usando a malha escolhida acima e malhas mais refinadas. Alterou-se o perfil de compactação e também não se obteve mudança significativa. Portanto inicialmente não se estabeleceu uma correlação na resposta geométrica entre o artigo simulado e o real, que era o pretendido.

Surgiu a oportunidade de acompanhar o processo de injeção do molde e registar possíveis discrepâncias da parametrização do simulador e da máquina injetora e observou-se uma incongruência. Na folha onde constavam as várias variáveis de processo também constava o perfil da velocidade do fuso aplicada na injeção. Sabendo que o diâmetro do cilindro onde se encontra o polímero fundido é 28 mm e sabendo o perfil de velocidade do fuso então consegue-se obter o caudal durante a injeção. O perfil de injeção caracteriza-se pela velocidade ao longo do percurso do fuso. Neste caso o perfil é de 80 mm/s em x_1 e 100 mm/s em x_2 até à comutação como se observa na figura 3.16. Depois desta comutação o controlo passa a ser efetuado por pressão para compactar o material no interior do molde.

Posto isto tem-se:

$$v_1 = 80 \text{ mm/s}$$

$$v_2 = 100 \text{ mm/s}$$

$$Volume_{injetado} = 1848.6 \text{ mm}^3$$

$$\varnothing_{Cilindro} = 28 \text{ mm}$$

$$x_1 = 1 \text{ mm}$$

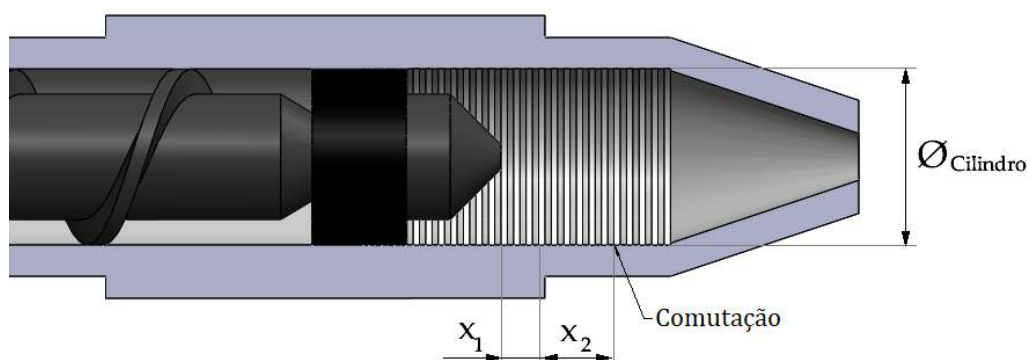


Figura 3.16: Perfil do cilindro e fuso da máquina injetora com curso utilizado na injeção

Com o volume obtido no simulador de todos os interstícios a ser preenchidos pelo polímero consegue-se obter o tempo real que demora a serem preenchidos. Primeiramente calcula-se o volume do material injetado no curso x_1 :

$$\pi + r^2 \times x_1 = V_1 \Leftrightarrow \pi \times 14 \times 1 = 615mm^3 \quad (3.1)$$

Seguidamente calcula-se o curso x_2 necessário para preencher o volume injetado:

$$V_1 + \pi + r^2 \times x_2 = 1848.6 \Leftrightarrow x_2 = 2.003mm \quad (3.2)$$

Sabendo os cursos e a velocidade obtém-se o tempo de injeção:

$$t_1 = \frac{x_1}{v_1} = \frac{1}{80} = 0.0125s \quad (3.3)$$

$$t_2 = \frac{x_2}{v_2} = \frac{2.003}{100} = 0.0200s \quad (3.4)$$

$$t_{inj} = t_1 + t_2 = 0.0325s \quad (3.5)$$

Pelo tempo calculado verifica-se que existe uma discrepância de uma ordem de grandeza em relação ao valor indicado pela máquina injetora. Logo o valor indicado pela máquina não é indicado para parametrizar a simulação.

Posto isto efetuou-se uma nova simulação em que a injeção foi parametrizada pelo perfil de velocidade do fuso. Com esta alteração a resposta geométrica alterou drasticamente e o batimento medido foi de 0.040 mm que se aproxima bastante das medições efetuadas nas peças injetadas.

Por fim ajustaram-se os tempos associados aos processos, isto é, tempo de compactação, tempo de arrefecimento e tempo de abertura do molde. Estes valores foram alterados porque no *Moldflow* o tempo de arrefecimento refere-se a tempo absoluto de arrefecimento e no relatório de teste refere-se a tempo exclusivo de arrefecimento. Ou seja, existe uma sobreposição dos tempos de compactação e arrefecimento, logo o material pode estar a compactar e a arrefecer ou apenas a arrefecer. Depois desta alteração o batimento a que se chegou foi de 0.035 mm. Este valor será usado como referência para o conjunto de simulações previstas.

RESULTADOS

4.1 Pressupostos

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas experiências efetuadas por simulação numérica no *Moldflow*. Pretende-se obter uma noção das tendências da resposta face à alteração da geometria do artigo, alteração no molde e variação das condições de processo. Neste tipo de simulações pretende-se apenas obter uma maior compreensão dos fenómenos associados à tecnologia de injeção de polímeros, sabendo que os valores obtidos não são necessariamente síncronos na sua magnitude com os valores reais.

O conjunto de simulações efetuadas partem do artigo validado ilustrado na figura 4.1. Portanto qualquer variação de espessura, diâmetro, ataque ou outro têm como ponto central de referência as condições do artigo validado. Este será representado nos gráficos por um losango.

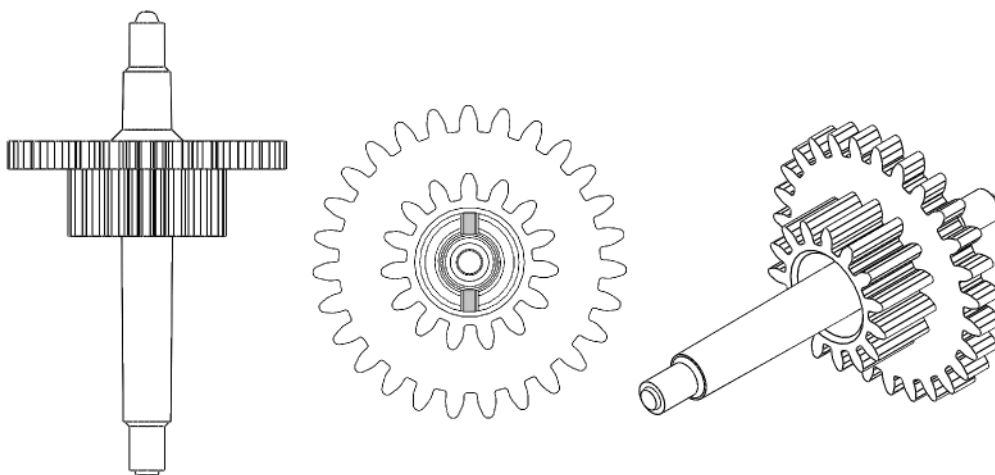


Figura 4.1: Artigo de referência para simulações

O conjunto de experiências efetuadas consiste na alteração da geometria do artigo e ataque e alteração das variáveis operatórias do processo de injeção.

4.2 Alterações geométricas

4.2.1 Ataque

Para esta variação efetuaram-se 8 simulações distintas em que o objeto de estudo é a dimensão da secção do ataque circular. Os diâmetros dos ataques simulados foram $\varnothing_1=0.4\text{mm}$, $\varnothing_2=0.5\text{mm}$, $\varnothing_3=0.7\text{mm}$, $\varnothing_4=0.8\text{mm}$, $\varnothing_5=0.9\text{mm}$, $\varnothing_6=1.0\text{mm}$, $\varnothing_7=1.5\text{mm}$ e $\varnothing_8=1.8\text{mm}$.

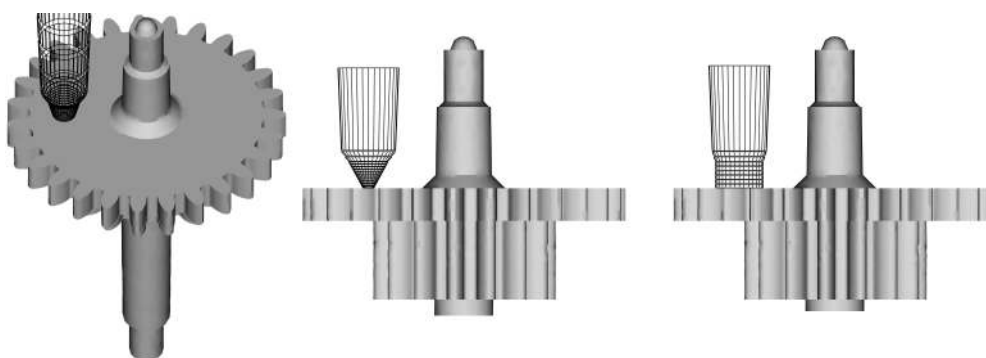


Figura 4.2: **Configuração do ataque** - à esquerda tem-se representada a localização e configuração do ataque na peça de referência, no meio tem-se a configuração com diâmetro menor e à direita tem-se a configuração com diâmetro máximo.

Ao fazer variar esta dimensão verificou-se que a resposta obtida no batimento não é uma tendência clara linear crescente ou decrescente. Como se verifica na figura 4.3 existe um comportamento com um máximo de 0.043 milímetros de batimento para o diâmetro no valor de 0.8 milímetros. Quanto maior o diâmetro do ataque para além do valor máximo, menor tende a ser o batimento medido. No entanto regista-se também um decréscimo quando se diminui o diâmetro do ataque a partir do máximo, embora que não seja uma diminuição contínua.

Observando a figura 4.4 verifica-se que o apoio superior tem uma magnitude de desvio maior e contém apenas valores positivos, isto é, todos no mesmo sentido do desvio. Quanto ao desvio inferior verifica-se que este para além da diminuição da magnitude do desvio a partir do diâmetro 0.8 milímetros também contém valores negativos para diâmetros inferiores a aproximadamente 0.5 milímetros. Logo para diâmetros de ataque abaixo de aproximadamente 0.5 milímetros o sentido do desvio é o oposto ao verificado no apoio superior.

Examinando os fenómenos que ocorrem no interior da zona moldante podem tirar-se ilações quanto às possíveis causas dos efeitos observados e descritos anteriormente. É expectável que ao diminuir a secção do ataque que a velocidade com que o material fundido entra na zona moldante aumente. Observa-se também que quanto menor a secção

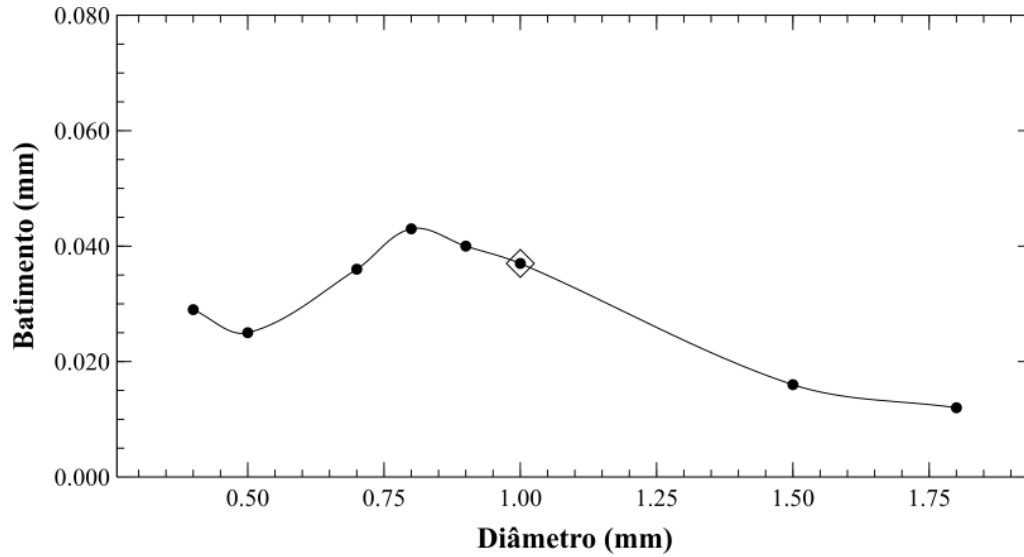


Figura 4.3: Variação do desvio dos apoios ao eixo da peça em função do diâmetro do ataque

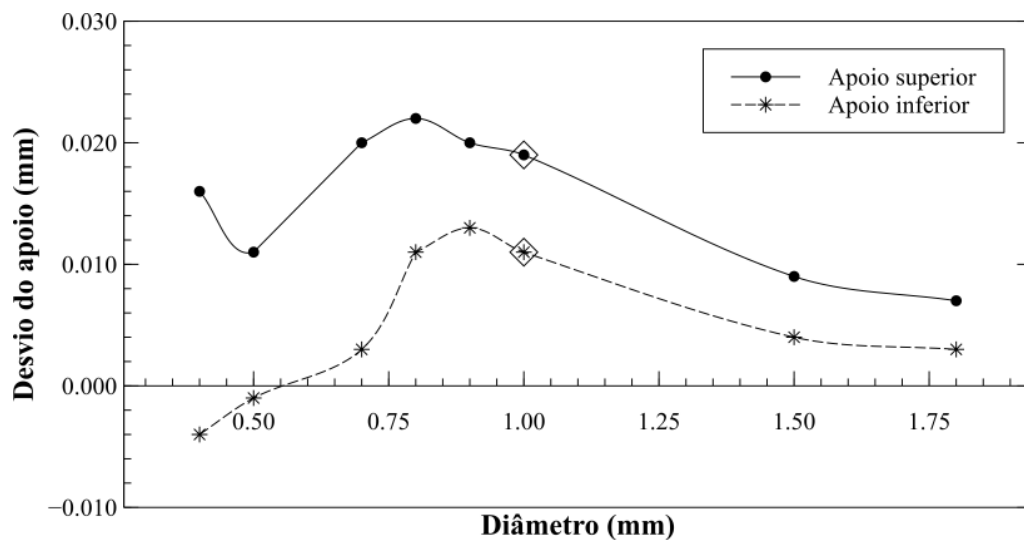


Figura 4.4: Desvios dos apoios em função do diâmetro do ataque

do ataque maior o aumento de temperatura no interior da cavidade bem como uma maior contração do material.

Existem dois fenómenos que contribuem para o aquecimento do polímero no interior da cavidade: criação de tensões de corte no escoamento e compressão no polímero [12].

Visto que a velocidade aumenta para secções menores então a taxa de corte tende a aumentar. Posto isto a temperatura tende a aumentar também. No entanto verifica-se que é com a compressão que se verifica um aumento generalizado e bastante notório. Isto é quando o material preenche as lacunas da zona moldante e é sujeito à pressão imposta pela máquina injetora este liberta esta energia sobre a forma de calor.

Na figura 4.5 estão representados, no plano onde ocorre o defeito, a velocidade do escoamento (a), a taxa de corte (b) e temperatura (c). Observa-se que o aumento da temperatura acontece em redor do ataque onde se encontra a maior taxa de tensões de corte. O restante material está a uma temperatura inferior, portanto a dispersão das temperaturas, ainda que assimétrica, pode não causar defeitos. Na figura 4.6 consegue-se ver que nos instantes seguintes a dispersão térmica (1)(2)(3) é bastante diferente. Os três primeiros fotogramas são três instantes no processo de injeção e no quarto fotograma está a contração volumétrica (S). Observa-se na sequência de instantes, especialmente no segundo fotograma (2), que quando o material preenche todo o espaço da cavidade a temperatura aumenta drasticamente numa grande porção do artigo. No terceiro fotograma (3) está a dispersão depois do polímero arrefecer aproximadamente 1 segundo e esta dispersão mantém-se durante alguns instantes. Logo devido a esta dispersão térmica a contração do material é diferente ao longo de cada ponto no plano observado.

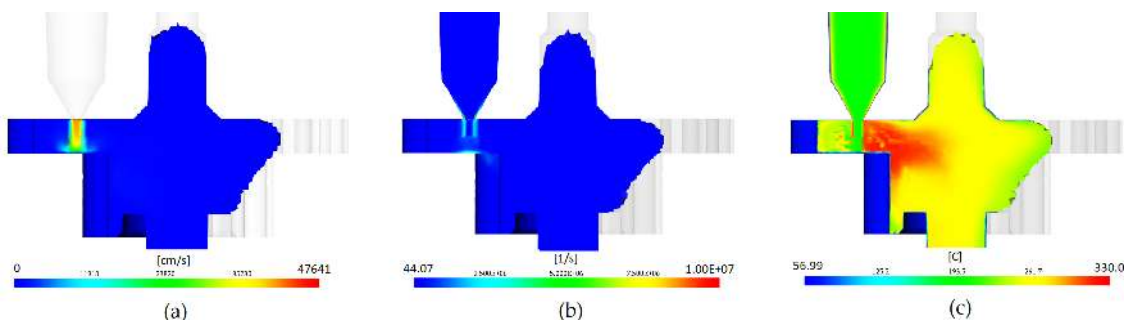


Figura 4.5: Resultados de velocidade, taxa de tensões de corte e temperatura a aproximadamente 50% do enchimento da cavidade

Visto que existe uma assimetria na contração do artigo no plano de corte ilustrado acima então a peça tenderá a deformar-se não uniformemente. Logo tudo indica que existe uma correlação com a dimensão da secção do ataque e o empeno obtido.

Existe a necessidade de averiguar a razão pela qual o comportamento do batimento não é o esperado pelos fenómenos descritos acima. Isto é, o desvio dos apoios para diâmetros de secção de ataque inferiores a 0.9 milímetros não correspondem à tendência decrescente para os valores superiores a 0.9. Na figura 4.7 está ilustrada a relação do número de Mach referente ao material usado com o desvio do apoio inferior. Nesta figura

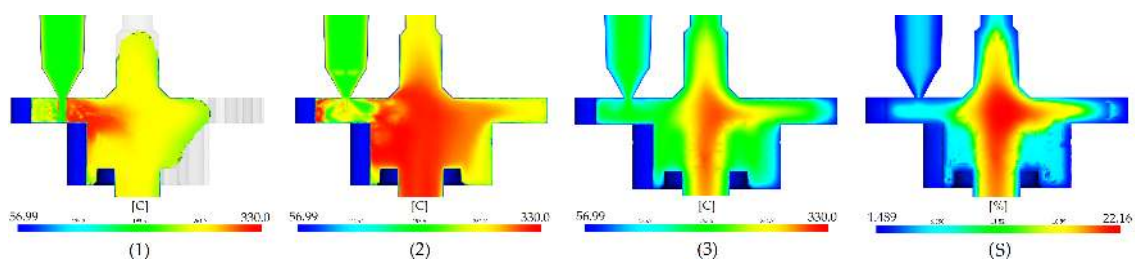


Figura 4.6: Resultados de temperatura sequenciais (três primeiros fotogramas) e contração volumétrica (quarto fotograma)

verifica-se que a partir de um número de Mach superior a 0.075 o desvio do apoio inferior inverte a tendência do seu empeno. Para números de Mach superior a 0.125 regista-se até um desvio na direção oposta à registada em todas as outras simulações.

Através destes resultados depreende-se que quanto menor a dimensão do ataque, maior será a contração do artigo e para grandes contrações a ocorrência de empenos tenderá a ser maior. O fator que influenciará a ocorrência deste mesmo empeno quando a contração é relativamente alta será a geometria do artigo. Logo para a geometria da peça em estudo denota-se a instabilidade gerada na resposta dimensional para dimensões de ataque inferiores a 0.9 milímetros. Neste caso concreto o batimento decresce devido especialmente à alteração da tendência da direção do desvio dos apoios. Para um artigo geometricamente distinto do simulado poderia não se verificar esta diminuição no defeito.

Para geometrias diversas não é recomendável usar uma dimensão de ataque reduzida visto que a contração elevada pode gerar defeitos geométricos bem como degradação do material pelas temperaturas elevadas obtidas.

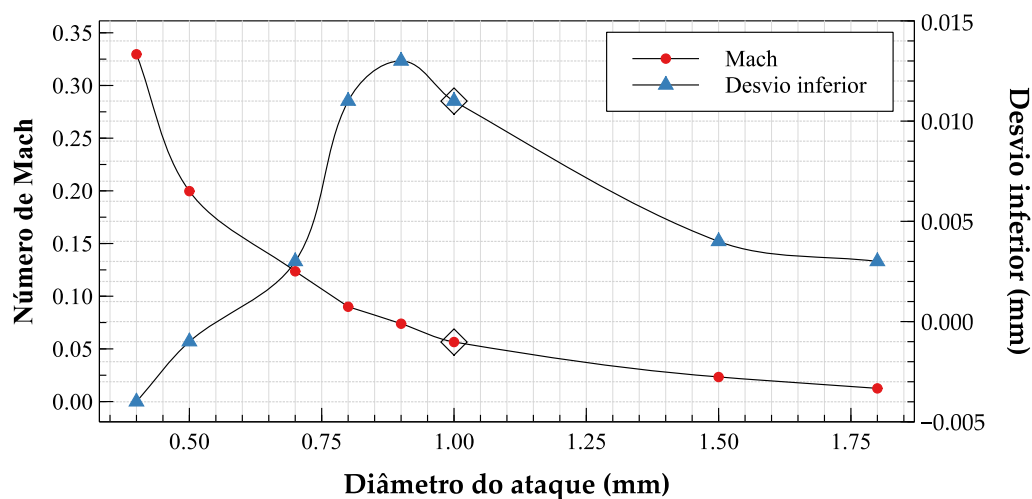


Figura 4.7: Variação do número de Mach e desvio do apoio inferior com o diâmetro do ataque

Foram efetuadas simulações com modalidades de ataque e localizações diferentes que estão ilustradas na figura 4.8 bem como a dispersão de temperaturas. Estas simulações têm como propósito confirmar a hipótese da correlação da assimetria da temperatura

do polímero na cavidade com o empeno. Para estas simulações usaram-se ataques com secção circular de diâmetro de 0.7 milímetros.

Tabela 4.1: Resultados do batimento para o ataque superior, inferior e lateral

	Superior vertical	Superior oblíquo	Inferior vertical	Lateral oblíquo
Batimento [mm]	0.001	0.070	0.004	0.026

Consegue-se observar na imagem figura 4.8 que para as injeções oblíquas (b) e (d) há um acréscimo significativo da temperatura numa porção considerável da cavidade e pela tabela 4.1 confirma-se que esta assimetria está correlacionada com o valor do batimento. Observa-se também que os valores de batimento para os ataques verticais, com escoamentos axisimétricos, são bastante reduzidos podendo ser considerados nulos.

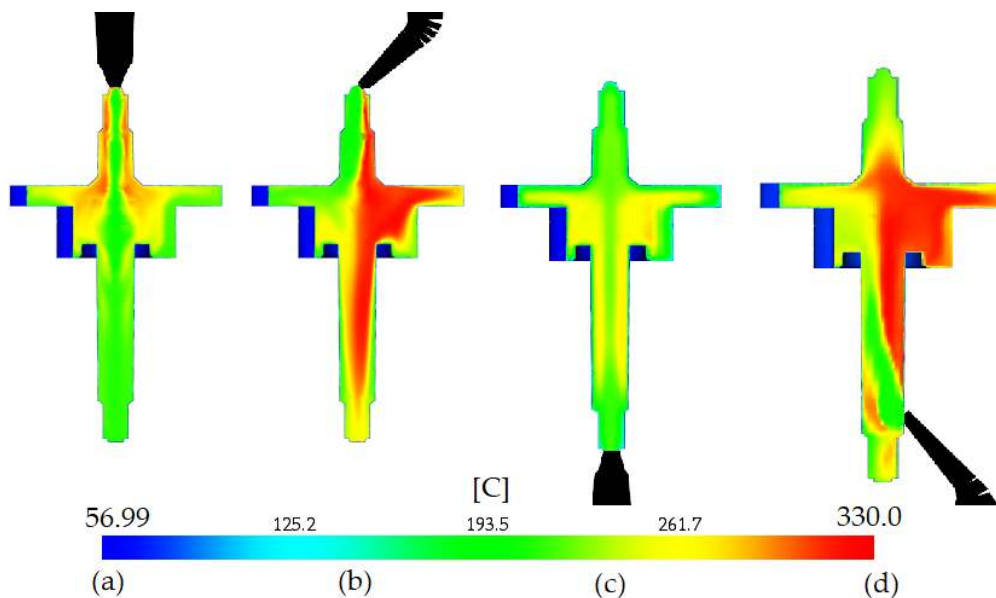


Figura 4.8: Dispersão de temperaturas no plano onde ocorre o empeno das configurações com ataque (a preto) alternativo

Seguidamente altera-se a distância do ponto de injeção ao eixo da peça não deformada. Esta variação prova ser pouco significativa como se observa na figura 4.9 onde estão representados os valores do batimento com o afastamento do ataque em relação ao eixo.

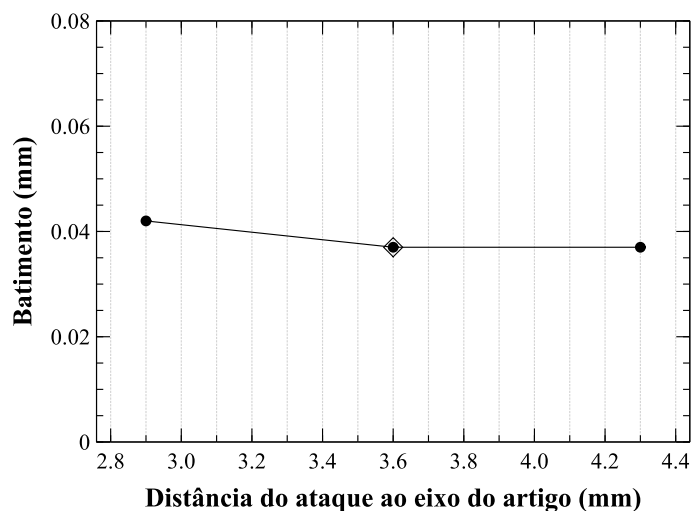


Figura 4.9: Variação do batimento com a distância ao eixo do artigo não deformado

4.2.2 Diâmetros das rodas dentadas

Efetuarão-se quatro simulações variantes da simulação de referência com o propósito de estudar a influência do diâmetro das rodas dentadas no batimento medido. Tomaram-se valores de diâmetro com uma diferença de aproximadamente 30% do valor de diâmetro de referência.

Observa-se na figura 4.10 uma tendência bastante significativa especialmente nas variações do diâmetro da roda dentada maior. Para diâmetros maiores há uma maior quantidade de material o que neste caso faz com que o aumento de temperatura se verifique numa porção mais extensa do artigo e aumenta a contração máxima sofrida pelo material. Verifica-se o mesmo tipo de dispersão de contração observado no último fotograma da figura 4.6. Desta forma o defeito é exacerbado em relação aos valores de referência.

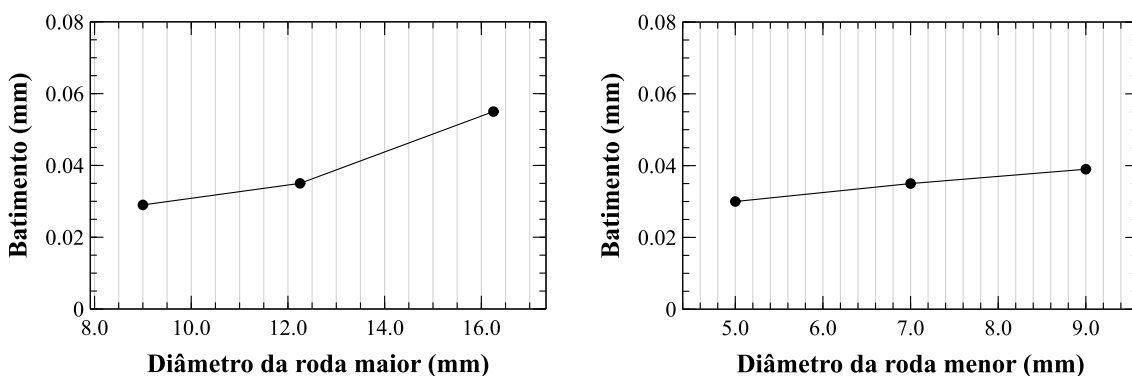


Figura 4.10: Variação do batimento com o diâmetro das rodas dentadas

4.2.3 Concordâncias

Entende-se por concordâncias as transições entre secções com dimensões distintas que, neste artigo, são boleados. Pretende-se perceber se estas características têm um papel relevante na resposta final da peça. Efetuaram-se 4 variações da peça de referência nomeadamente no raio das concordâncias.

Na figura 4.11 estão apresentados os resultados das simulações enunciadas acima. Verifica-se que esta variável não toma um papel preponderante na resposta geométrica do sistema. Não se regista também uma variação relevante nos valores da contração volumétrica.

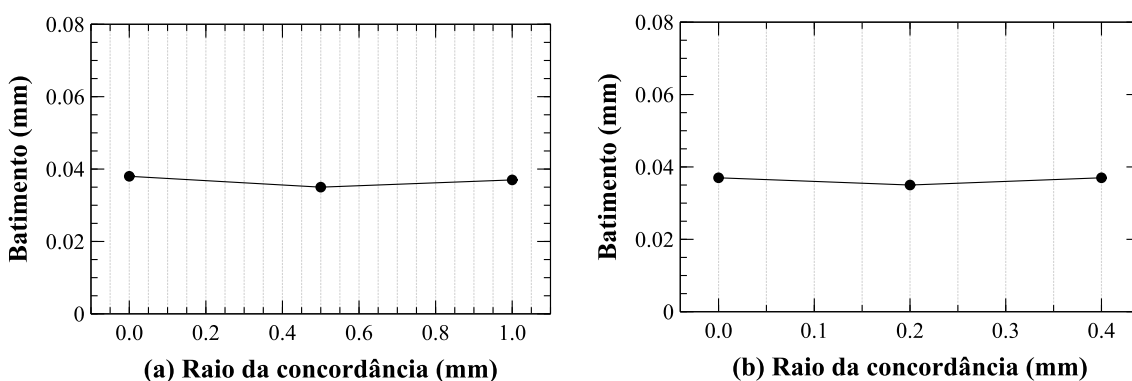


Figura 4.11: Variação do batimento com o raio das concordâncias entre o apoio superior e a roda dentada maior (a) e entre o apoio inferior e a roda dentada maior (b)

4.2.4 Nervuras

Nas alterações do artigo com nervuras pretende-se abordar a variação da secção resistente do artigo na resposta geométrica. Pretende-se isolar vários casos diferentes das nervuras para observar a resposta de cada apoio isoladamente. As variações adotadas estão na figura 4.12.

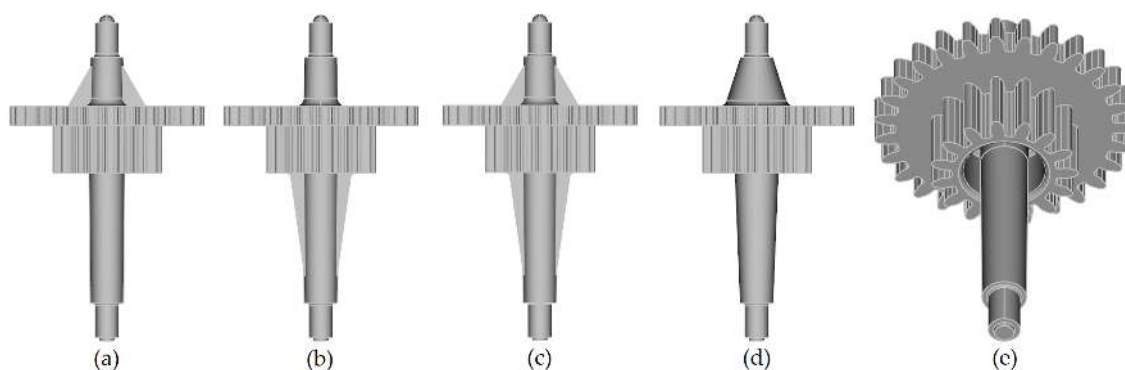


Figura 4.12: Configurações de nervuras simuladas - nervura superior (a), nervura inferior (b), nervuras superior e inferior (c), veio cónico (d) e sem qualquer nervura (e)

Como se pode verificar na tabela 4.2, para as configurações (a) e (b) o uso da nervura nos apoios limita o seu desvio em relação ao eixo da peça não deformada. Consegue-se ver que o uso da nervura em cada apoio restringe o seu desvio e não altera significativamente o outro apoio. Efetivamente, ao limitar os desvios dos apoios, o valor do batimento é reduzido substancialmente com se observa com a configuração (c). Na configuração (e) foi retirada a nervura previamente existente no artigo de referência e denota-se um grande aumento no batimento causado especialmente pelo desvio no apoio inferior que triplica o seu valor.

Tabela 4.2: Valores de desvios e batimento das simulações de configurações com nervuras

	Configurações das nervuras					Referência
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
Desvio superior [mm]	0.012	0.016	0.011	0.015	0.020	0.019
Desvio inferior [mm]	0.012	0.004	0.005	0.014	0.030	0.010
Batimento [mm]	0.027	0.029	0.021	0.034	0.048	0.035

A configuração (d) foi escolhida de forma a testar a resposta alterando a sua resistência à flexão como nas restantes configurações, no entanto com a adição de uma quantidade significativa de material no artigo. Desta forma optou-se por tornar o veio cónico ainda que esta característica não seja uma nervura. Como se verifica na Tabela 4.2 os resultados não foram relevantes quanto à sua resposta. Isto é, o batimento permanece quase inalterado mesmo com a adição de uma secção que tenderia a resistir mais facilmente a deformações. Pode inferir-se que existem dois fenómenos antagónicos que neste caso particular se anulam, isto é, aumenta-se a resistência à deformação, mas também se aumenta a contração volumétrica como se observa na figura 4.13.

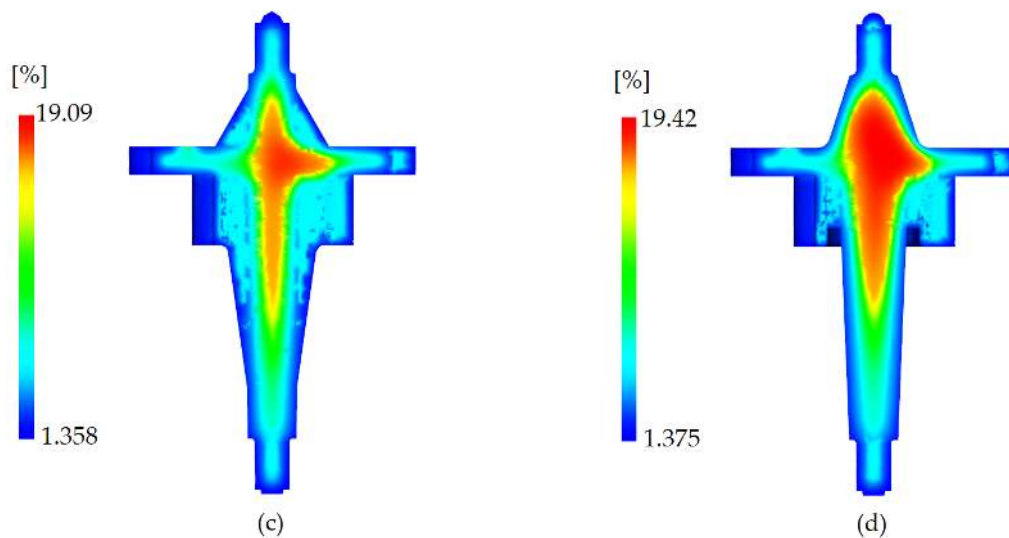


Figura 4.13: Contração da configuração (c) e (d) no plano onde ocorre o empeno

4.2.5 Vazios

Neste conjunto de simulações pretende-se alterar a dimensão do vazio localizado no interior da roda menor da peça de referência com o intuito de perceber se esta lacuna de material afeta a resposta geométrica. Na figura 4.14 estão as configurações escolhidas e como visto anteriormente existem indícios que um volume de material maior aumente a contração volumétrica e poderá causar empenos maiores. Nestas configurações mantiveram as dimensões máximas da roda menor, isto é, o seu diâmetro e comprimento permanecem iguais ao artigo de referência alterando-se apenas a espessura até deixar de haver vazio.

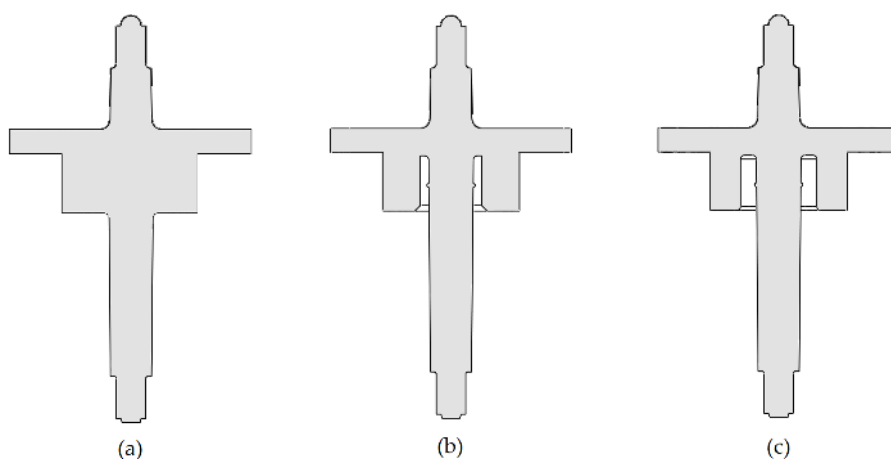


Figura 4.14: Configurações das simulações dos vazios - Sem vazio (a), vazio com 0.5mm de espessura (b) e vazio de referência (c)

Observa-se na Figura 4.15 que não existe variação significativa no batimento para dimensões distintas. Era esperado que, pela maior concentração de material, a contração aumentasse e causa-se empeno. No entanto verifica-se que mesmo quando não há vazio, ou seja, quando existe um grande volume de material a resposta não altera significativamente. Isto pode se dar devido à alteração da secção resistente. Logo ao aumentar a contração também se aumenta a resistência da peça a uma qualquer flexão. Desta forma estes dois fenómenos contrariam-se e não alteram significativamente a resposta.

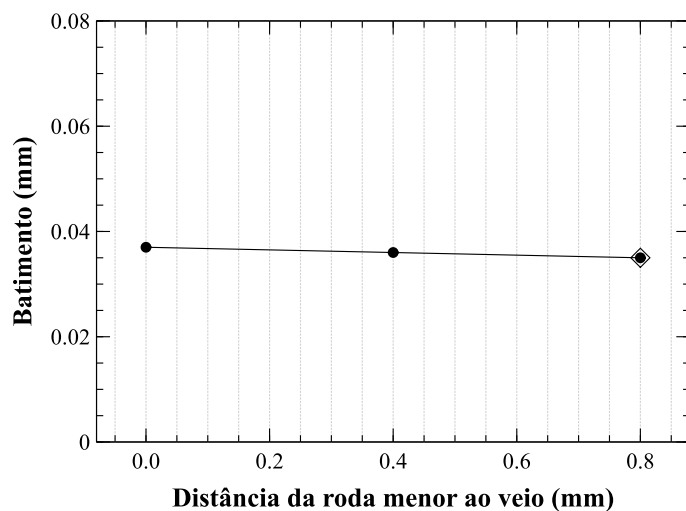


Figura 4.15: Variação do batimento com o tamanho do vazio no interior da roda dentada menor. A dimensão usada no eixo das abcissas é medida desde a face interior da roda dentada menor até à superfície do veio.

4.2.6 Espessuras

Neste conjunto de simulações fez-se variar a espessura da roda dentada maior de modo a perceber se a adição deste material afeta a resposta geométrica. Como se pode perceber na figura 4.16 esta variação na espessura tem pouca influência no batimento.

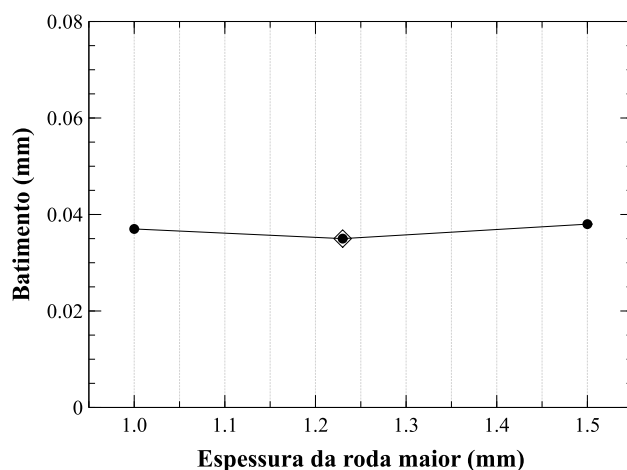


Figura 4.16: Variação do batimento com a espessura da roda dentada maior

4.3 Alterações das variáveis de injeção

As variáveis de injeção tomam um papel preponderante na forma final dos artigos injetados como visto anteriormente. Desta forma, ao surgir a oportunidade de testar o molde com os insertos da peça de referência, efetuaram-se algumas experiências. Estas experiências tiveram como principal objetivo otimizar o processo bem como a resposta geométrica

dos artigos. Visto que o teste deste tipo de ferramentas é dispendioso e moroso, não se pôde efetuar um estudo detalhado da influência de todas as variáveis da injeção. Posto isto, ao observar vários resultados do conjunto de simulações efetuadas anteriormente, escolheram-se as variáveis:

- Velocidade de injeção;
- Pressão de compactação;
- Tempo de arrefecimento.

Para cada variável foram medidas três moldações distintas, isto é, três artigos de cada cavidade e foram mantidas todas as restantes variáveis usadas na referência base.

Como visto anteriormente a velocidade de injeção toma um papel preponderante na resposta geométrica do artigo. Desta forma injetaram-se moldações com velocidades no valor de 30 mm/s e 150 mm/s. Pela tabela 4.4 percebe-se que existe uma diferença significativa relativamente à tabela 4.3 que indica os valores medidos para as condições da referência base. Verifica-se que se consegue baixar em aproximadamente 25% o defeito médio nestas condições para uma velocidade de 30mm/s e que a velocidade a 150mm/s não piora o batimento registado.

A pressão de compactação é distinguida na literatura como uma variável preponderante na maioria dos casos [13][14]. Posto isto perante o aumento da compactação seria de esperar uma redução do batimento, no entanto pela tabela 4.5 verifica-se que não tem efeitos relevantes.

Tabela 4.3: Batimento medido da peça de referência com as variáveis de referência.

Referência base	Batimento medido (mm)			Valor médio
Cavidade 1	0.015	0.015	0.020	0.017
Cavidade 2	0.020	0.020	0.025	0.022

Tabela 4.4: Batimento medido nas moldações com velocidades de injeção alteradas.

	Batimento medido [mm]							Valor médio
	$v_{inj} = 30mm/s$			Valor médio	$v_{inj} = 150mm/s$			
Cavidade 1	0.020	0.020	0.020	0.020	0.015	0.015	0.010	0.013
Cavidade 2	0.015	0.010	0.010	0.012	0.025	0.030	0.025	0.026

Tabela 4.5: Batimento medido nas moldações de compactação alterada.

	Batimento medido [mm]			
	P=65 MPa			Valor médio
Cavidade 1	0.015	0.015	0.020	0.017
Cavidade 2	0.020	0.020	0.025	0.022

4.3. ALTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS DE INJEÇÃO

Finalmente alterou-se o tempo de arrefecimento. Observou-se previamente nas simulações da peça de referência que o artigo arrefecia quase até à temperatura do molde passados apenas aproximadamente 5 segundos. Logo o tempo de arrefecimento de referência, que é de 17 segundos, está bastante exagerado para a necessidade de arrefecimento efetiva. Na tabela 4.6 verifica-se que o batimento é reduzido em aproximadamente 30% e o tempo é reduzido em mais de 50%. Para 25 segundos de arrefecimento não se verifica alteração significativa no valor médio do batimento.

Tabela 4.6: Batimento medido nas moldações com o tempo de arrefecimento alterado

	Batimento medido [mm]							
	$t_{arrefecimento} = 8s$			Valor médio	$t_{arrefecimento} = 25s$			Valor médio
Cavidade 1	0.020	0.020	0.020	0.020	0.015	0.015	0.010	0.013
Cavidade 2	0.015	0.010	0.010	0.012	0.025	0.030	0.025	0.026

Perante os resultados obtidos consegue-se verificar que a magnitude de um defeito num artigo injetado pode ser minimizada através das variáveis operatórias sobre as quais o processo assenta. Verifica-se também que a ferramenta *Moldflow Insight* desempenha um papel preponderante na otimização da injeção visto que este consegue prever os fenómenos que são intrinsecamente dependentes da geometria do artigo. Compreende-se que o uso desta ferramenta, se usado frequentemente e especialmente em moldes de geometria complexa, acrescenta um grande valor ao tornar a resposta ao cliente célere e mais fundamentada.

CONCLUSÃO

5.1 Principais Conclusões

Apresentados os resultados e as ideias descritas anteriormente no documento há a necessidade de concluir quais os aspectos essenciais obtidos neste estudo. Conclui-se que para:

Ataque:

-Quanto menor o ataque maior a temperatura e possibilidade de grandes discrepâncias na contração volumétrica. Isto é, aumenta a velocidade a que o fundido entra na cavidade e o aumento de temperatura pode causar as discrepâncias na contração e, caso se formem assimetrias na sua dispersão, a peça terá defeitos evitáveis.

-A simetria no escoamento é um fator bastante relevante para a minimização do defeito do empeno e robustez no processo de injeção da ferramenta. Isto implica que para peças axisimétricas idealmente o ataque deveria ser no eixo da peça e com uma geometria que possibilite um escoamento em linha com este mesmo eixo.

Diâmetro das rodas dentadas:

-Quanto maior o diâmetro das rodas dentadas maior o batimento registrado neste caso particular. Verifica-se que no aumento do diâmetro a temperatura aumenta significativamente que tem um efeito na contração não simétrica resultando no batimento excessivo.

Nervuras:

-A adição de nervuras pode ser fulcral para alguns artigos na minimização de empenos devido ao aumento da secção resistente. Estes elementos construtivos devem ser colocados em superfícies não úteis quando se esperar uma deformação numa direção tal, que o momento de inércia seja maior devido à secção da nervura.

-Estas não devem alterar demasiado a espessura relativamente à espessura média do artigo visto que o efeito da contração pelo aumento do volume de material pode piorar o desvio geométrico.

Velocidade de injeção:

-Quanto menor a velocidade da injeção, menor o risco de ocorrer o fenómeno de aquecimento no interior da cavidade e conseqüentemente menor o risco de haver deformações. No entanto velocidades muito baixas podem resultar em hesitações e *short shots*. Neste caso particular, para a velocidade mínima escolhida, não ocorreu qualquer hesitação ou falta de enchimento. O tempo de ciclo pode ser afetado no entanto apenas residualmente visto que o tempo de injeção é tipicamente abaixo de 5% do tempo de ciclo total.

Todos os outros parâmetros estudados nesta dissertação revelaram não ter grande influência no batimento. As conclusões indicadas acima podem não ser representativas em casos em que a geometria da peça e o material polimérico não é similar ao estudado. Logo peças como cascas finas e com ataques geometricamente bastante distintos terão outros fatores que afetam significativamente o seu empeno

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Existem vários aspetos a estudar no âmbito da otimização do processo da injeção. Nesta dissertação exploraram-se a afetação das variáveis de processo e especialmente as variações geométricas dos artigos injetados e sua influência. No entanto podem-se solucionar problemas similares aos registados nesta dissertação com diferentes abordagens como por exemplo através de um arrefecimento adaptado à aos fenómenos térmicos presentes.

Devido à disponibilidade de tecnologias como sinterização é possível hoje a criação de zonas moldantes com geometrias bastante complexas possibilitando canais de arrefecimento que se aproximam mais dos canais ideais. A esta tecnologia dá-se o nome de *conformal cooling*. Desta forma torna-se interessante criar um mecanismo de escolha de geometria de canais de arrefecimento que se adaptem às necessidades de cada molde em particular não necessitando do *input* humano. Isto é, aquando o projeto da cavidade e bucha dos moldes, escolheriam-se os constrangimentos construtivos e recorreria-se a um algoritmo de escolha para a criação dos respetivos canais de arrefecimento.

É importante também quantificar qual a relação entre a secção resistente de uma peça e a concentração de material num dado volume da peça com a contração que leva ao

empeno. Isto é, a secção resistente aparenta diminuir o empeno que é contrabalançado pela adição de material. Poderá haver uma relação da adição do material com a área de superfície responsável pelo arrefecimento. Ao quantificar esta relação poderá chegar-se a uma melhor compreensão dos mecanismos da contração que levam ao empeno e à respetiva solução.

BIBLIOGRAFIA

- [1] U. plastic group. *Stress in injection molded parts*. URL: <http://www.unitedplastic-group.com/stress-in-injection-molded-parts.html>.
- [2] A. Guevara-Morales e U. Figueroa-López. “Residual stresses in injection molded products”. Em: *Journal of Materials Science* 49.13 (2014), pp. 4399–4415. ISSN: 15734803. DOI: [10.1007/s10853-014-8170-y](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8170-y).
- [3] L. Cerejo, N. Novo, N. Sousa e T. Vitorino. “O sector fala de... Reologia”. Em: *Molde (Cefamol)* (2018), pp. 34–38.
- [4] Bayer Material Science. *Bayer Engineering Polymers - Part and Mold Design: Thermoplastics. A Design Guide*. Vol. 1. 1. 2000. ISBN: 2001018177. DOI: [10.1016/0003-682X\(69\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(69)90016-4).
- [5] Centimfe e U. d. M. Departamento de Engenharia de Polímeros. *Manual do projetista*. 2003. ISBN: 972-98872-1-7.
- [6] J Zhao, R. H. Mayes, G. E. Chen, H. Xie e P. O.H. S. Chan. “Effects of Process Parameters on the Micro Molding Process”. Em: 43.9 (2003).
- [7] Celanese Engineered Materials. *Hostaform pom*®. 2016.
- [8] DuPont. *DuPont™ Delrin® Acetal Homopolymer , White paper*. 2015. URL: [http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/plastics-polymers-and-resins/thermoplastics/documents/Delrin/DuPontDelrin\(R\)vsAcetalCopolymerWhitePaper.pdf](http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/plastics-polymers-and-resins/thermoplastics/documents/Delrin/DuPontDelrin(R)vsAcetalCopolymerWhitePaper.pdf).
- [9] DuPont. *DuPont™ Delrin® acetal resin Molding Guide*. 2006.
- [10] Ticona Celanese. “HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled”. Em: (2007), pp. 1–6.
- [11] Autodesk Ascent. *About mesh types used by Moldflow*. 2016. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/3PP-MDF-INSFUND-ASCENT/files/GUID-8007F781-B1BE-4252-8CA0-3B367D3DEAE9-htm.html>.
- [12] M Yue e A. Wood. “Polymer Bulletin 9”. Em: 132 (1994), pp. 127–132.
- [13] D. Annicchiarico e J. R. Alcock. “Review of factors that affect shrinkage of molded part in injection molding”. Em: *Materials and Manufacturing Processes* 29.6 (2014), pp. 662–682. ISSN: 15322475. DOI: [10.1080/10426914.2014.880467](https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880467).

BIBLIOGRAFIA

- [14] C. Huang, M.C. e Tai. “The effective factors in the warpage problem of an injection-mold part with a shell”. Em: *Journal of Materials Processing Technology* 110 (2001), pp. 1–9.

A N E X O



HOSTAFORM POM C9021 - FICHA TÉCNICA

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Description

Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM
Molding compound ISO 9988- POM-K, M-GNR, 03-002

POM copolymer

Standard-Injection molding type with high rigidity, hardness and toughness; good chemical resistance to solvents, fuel and strong alkalis as well as good hydrolysis resistance; high resistance to thermal and oxidative degradation.

Fulfills EG-directive 2002/72/EU as well as the recommendation XXXIII for consumer goods of the BgVV, corresponding to FDA-regulation for food contact.

UL-registration for all colours and a thickness more than 1.5 mm as UL 94 HB, temperature index UL 746 B electrical 110 °C, mechanical 90 °C.

Burning rate ISO 3795 and FMVSS 302 < 75 mm/min for a thickness more than 1 mm.

Ranges of applications: automotive engineering, precision engineering, electric and electronical industry, domestic appliances.

FDA = Food and Drug Administration (USA)
BgVV = Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin
FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard (USA)
UL = Underwriters Laboratories (USA)

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1410	kg/m ³	ISO 1183
Melt volume rate (MVR)	8	cm ³ /10min	ISO 1133
MVR test temperature	190	°C	ISO 1133
MVR test load	2.16	kg	ISO 1133
Mold shrinkage - parallel	2	%	ISO 294-4
Mold shrinkage - normal	1.8	%	ISO 294-4
Water absorption (23°C-sat)	0.65	%	ISO 62
Humidity absorption (23°C/50%RH)	0.2	%	ISO 62

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus (1mm/min)	2850	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress at yield (50mm/min)	64	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain at yield (50mm/min)	9	%	ISO 527-2/1A
Nominal strain at break (50mm/min)	30	%	ISO 527-2/1A
Tensile creep modulus (1h)	2500	MPa	ISO 899-1
Tensile creep modulus (1000h)	1300	MPa	ISO 899-1
Charpy impact strength @ 23°C	180P	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength @ -30°C	160	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength @ 23°C	6.5	kJ/m ²	ISO 179/1eA

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Charpy notched impact strength @ -30°C	6	kJ/m ²	ISO 179/1eA

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (10°C/min)	166	°C	ISO 11357-1,-2,-3
DTUL @ 1.8 MPa	104	°C	ISO 75-1/-2
Vicat softening temperature B50 (50°C/h 50N)	150	°C	ISO 306
Coeff.of linear therm. expansion (parallel)	1.1	E-4/°C	ISO 11359-2
Coeff.of linear therm. expansion (normal)	1.1	E-4/°C	ISO 11359-2
Flammability @1.6mm nom. thickn.	HB	class	UL94
thickness tested (1.6)	1.5	mm	UL94
UL recognition (1.6)	UL	-	UL94
Flammability at thickness h	HB	class	UL94
thickness tested (h)	3	mm	UL94
UL recognition (h)	UL	-	UL94

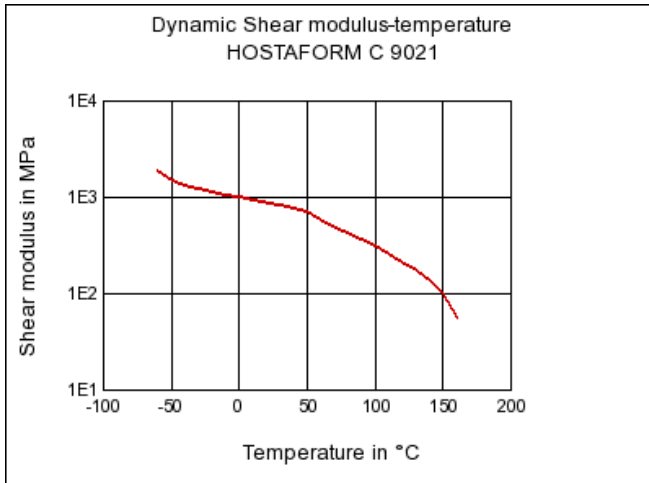
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity - 100 Hz	4	-	IEC 60250
Relative permittivity - 1 MHz	4	-	IEC 60250
Dissipation factor - 100 Hz	20	E-4	IEC 60250
Dissipation factor - 1 MHz	50	E-4	IEC 60250
Volume resistivity	1E12	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity	1E14	Ohm	IEC 60093
Electric strength	35	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index CTI	600	-	IEC 60112

Test specimen production	Value	Unit	Test Standard
Processing conditions acc. ISO	9988	-	Internal
Injection molding melt temperature	195	°C	ISO 294
Injection molding mold temperature	85	°C	ISO 294
Injection molding flow front velocity	200	mm/s	ISO 294
Injection molding hold pressure	90	MPa	ISO 294

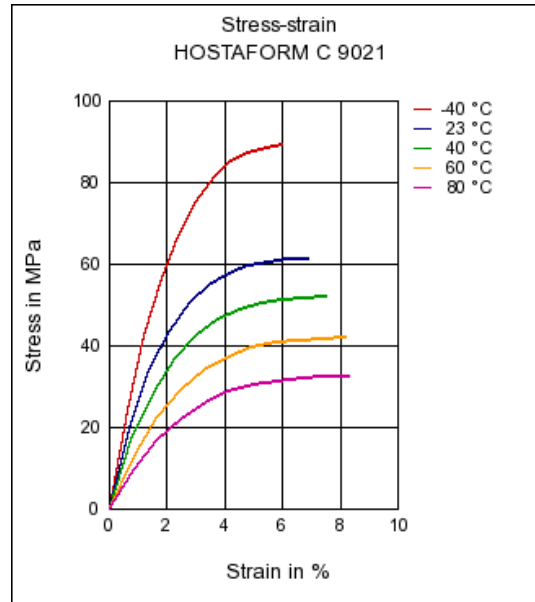
Rheological Calculation properties	Value	Unit	Test Standard
Density of melt	1200	kg/m ³	Internal
Thermal conductivity of melt	0.155	W/(m K)	Internal
Specific heat capacity of melt	2210	J/(kg K)	Internal
Eff. thermal diffusivity	4.85E-8	m ² /s	Internal
Ejection temperature	165	°C	Internal

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

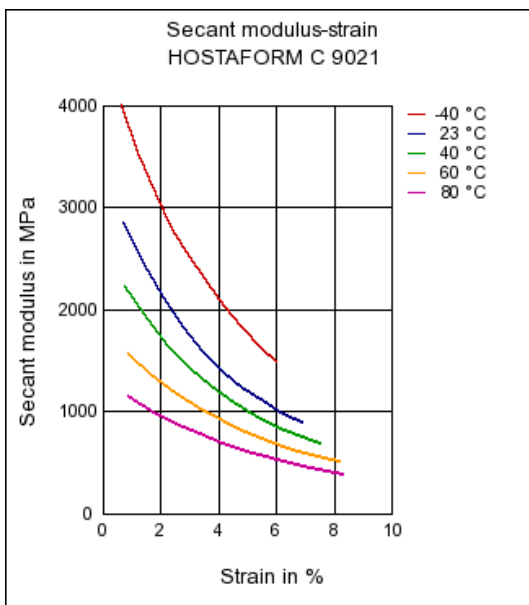
Dynamic Shear modulus-temperature



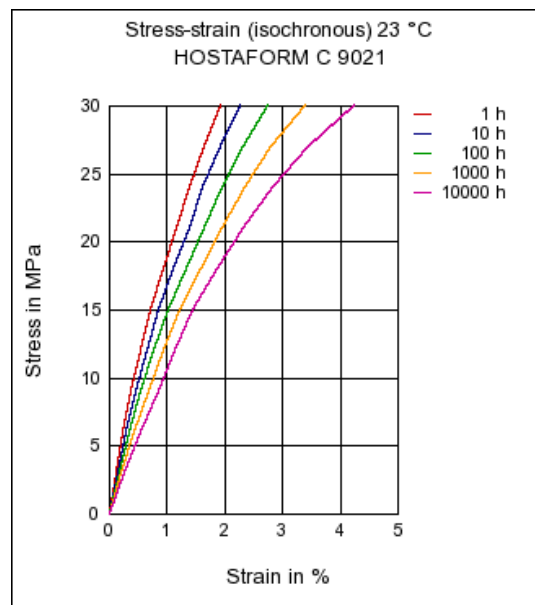
Stress-strain



Secant modulus-strain

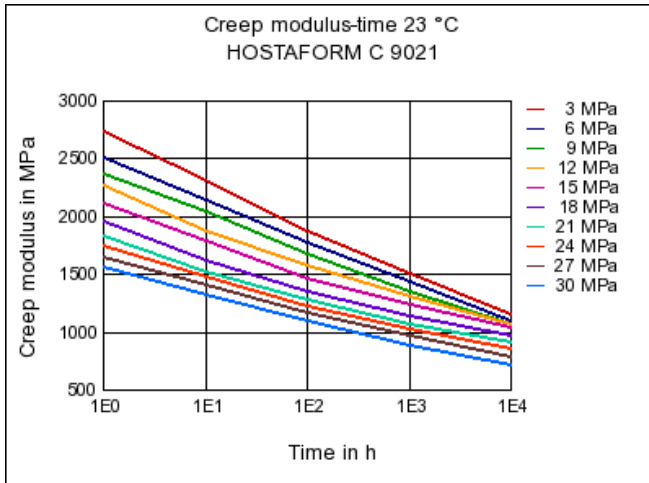


Stress-strain (isochronous)

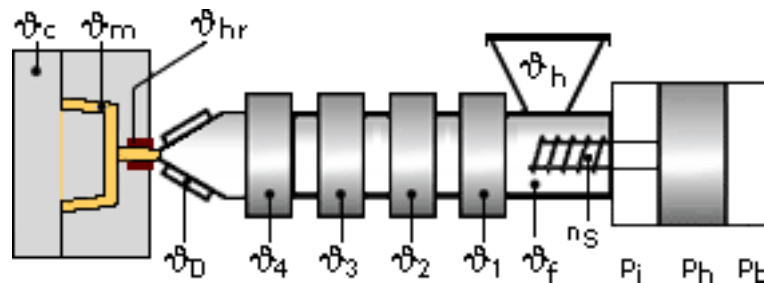


HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Creep modulus-time



Typical injection moulding processing conditions



Maximum residual moisture content: 0.1500%

Processing Temperatures:

	ϕCavity	ϕMelt	ϕHot Runner	ϕDie	ϕ4	ϕ3	ϕ2	ϕ1	ϕFeeding	ϕHopper
min (°C)	80	190	190	190	190	190	180	170	60	20
max (°C)	120	210	210	210	210	200	190	180	80	30

Processing Pressures:

	Injection Pressure	Holding Pressure	Back Pressure
min (bar)	600	600	0
max (bar)	1200	1200	40

Injection speed: slow - medium

Screw speed:

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Screw diameter (mm)	25	40	55
Screw speed (rpm)	120	100	70

Pre-drying conditions:

It is normally not necessary to dry HOSTAFORM. However, should there be surface moisture (condensate) on the molding compound as a result of incorrect storage, drying is required. A circulating air drying cabinet can be used for this purpose if the granules

The product can then be stored in standard conditions until processed.

Drying time: 3 - 4 h

Drying temperature: 120 - 140 °C

Special information:

No special information available.

Injection Molding

Standard injection moulding machines with three phase (15 to 25 D) plasticating screws will fit.

Melt temperature	190-230 °C
Mould temperature	60-120 °C

Film Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------

Other Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------

Profile Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Sheet Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature 180-190 °C

Contact Information

Americas

Ticona
Product Information Service
8040 Dixie Highway
Florence, KY 41042
USA
Tel.: +1-800-833-4882
Tel.: +1-859-372-3244
email: prodinfo@ticona.com
Ticona on the web: www.ticona.com

Customer Service

Tel.: +1-800-526-4960
Tel.: +1-859-372-3214
Fax: +1-859-372-3125

Europe

Ticona GmbH
Information Service
Tel.: +49 (0) 180-5842662 (Germany)*
+49 (0) 69-30516299 (Europe)
Fax: +49 (0) 180-2021202 (Germany & Europe)**
email: infoservice@ticona.de
Internet: www.ticona.com

*starting 01.01.2007 0,14€/minute + local landline rates
**0,06€/Call + local landline rates

General Disclaimer

NOTICE TO USERS: Values shown are based on testing of laboratory test specimens and represent data that fall within the standard range of properties for natural material. These values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes. Colorants or other additives may cause significant variations in data values.

Properties of molded parts can be influenced by a wide variety of factors including, but not limited to, material selection, additives, part design, processing conditions and environmental exposure. Any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the users and the manner of such use is the sole responsibility of the users, who must assure themselves that the material as subsequently processed meets the needs of their particular product or use.

To the best of our knowledge, the information contained in this publication is accurate; however, we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information. The information contained in this publication should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of the materials mentioned in this publication.

Moreover, there is a need to reduce human exposure to many materials to the lowest practical limits in view of possible adverse effects. To the extent that any hazards may have been mentioned in this publication, we neither suggest nor guarantee that such hazards are the only ones that exist. We recommend that persons intending to rely on any recommendation or to use any equipment, processing technique or material mentioned in this publication should satisfy themselves that they can meet all applicable safety and health standards.

We strongly recommend that users seek and adhere to the manufacturer's current instructions for handling each material they use, and entrust the handling of such material to adequately trained personnel only. Please call the telephone numbers listed (+49 (0) 69 30516299 for Europe and +1 859-372-3244 for the Americas) for additional technical information. Call Customer Services for the appropriate Materials Safety Data Sheets (MSDS) before attempting to process our products.

The products mentioned herein are not intended for use in medical or dental implants.

© Copyright 2007, Ticona, all rights reserved. (Pub. 28-Feb-2007)

A N E X O



**FOLHA DE TESTE - VARIÁVEIS DE PROCESSO E
CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA INJETORA**

Teste

Rua Nova Moinho de Cima
Cumeiras, Embra
2430-402 Marinha Grande
Apartado 596
2431-907 Marinha Grande
Portugal

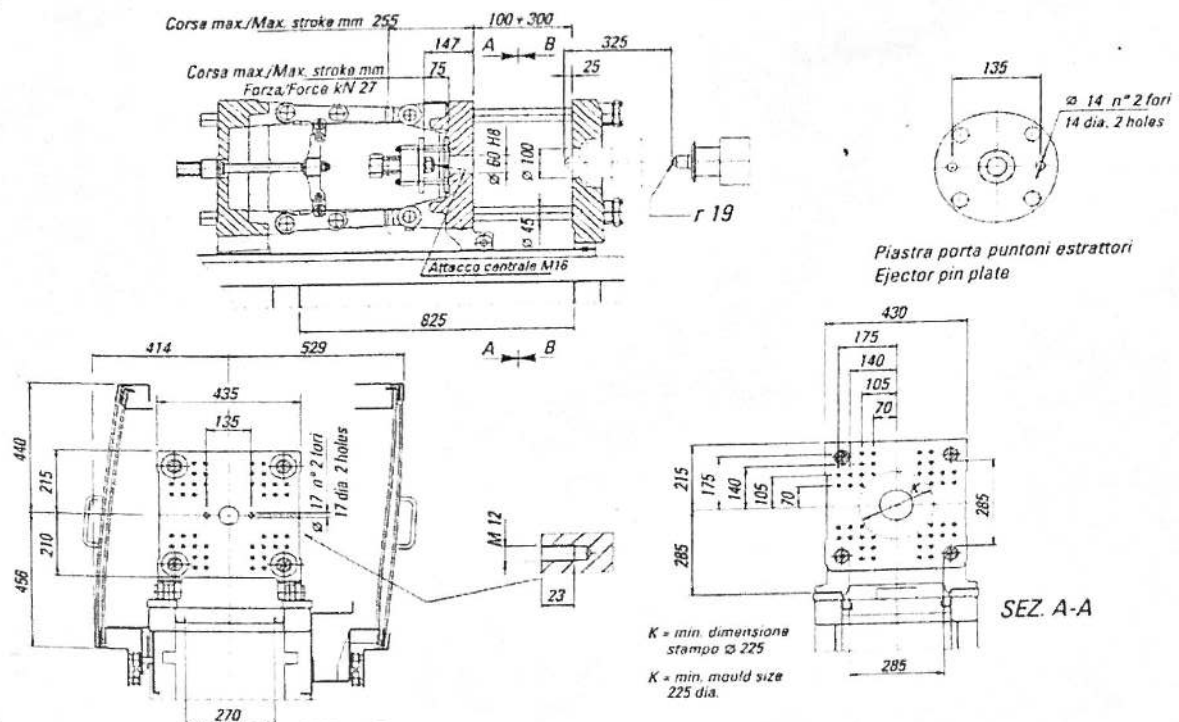
T +351 244 541 240
F +351 244 541 527

Email : geral@teste-plasticos.pt
www.teste.pt

Negri Bossi 40 T

Diâmetro fuso / Screw diameter	mm	28
Relação LD / Screw LtoD ratio	L/D	20
Volume Injecção / Injection Volume	Cc	92
Capacidade Injecção (PS) / Injection Capacity	gr	84
Velocidade injecção / Injection Rate	cc/s	66
Pressão Max. Sobre o material / Max. Pressure on Material	bar	1700
Rotação Max. Fuso / Max. Screw rotating speed	rpm	320

Força de Fecho / Clamping Force	kn	400
Curso de Abertura / Opening Stroke	mm	255
Max. Espessura Molde / Max. Mould Thickness	mm	300
Mínimo Espessura Molde / Minimum Mould Thickness	mm	100
Dimensões do prato / Platen Dimensions H X V	mm	420 X 420
Espaço Entre Colunas / Space Between Tie Bars H X V	mm	285 X 285
Conexões Pneumáticas / Pneumatic Connections	nº	3
Conexões Hidráulicas / Hydraulic Connections	nº	1



Test

Sociedade de Moldes e Injecção de Plást

Máquina: NB40
Machine: NB40

190 °C 190 °C 185 °C 180 °C °C °C

Bicos Quentes Hot Nozzles				Carburador Manifold	Anel M. Ring	Temperatura do Molde Mould Temperature	
1 - °	5 - °	9 - °	13 - °	1 - °	1 - °	Cavidade / Cavity	65
2 - °	6 - °	10 - °	14 - °	2 - °	2 - °	Bucha / Core	65
3 - °	7 - °	11 - °	15 - °	3 - °		E. Móveis / Cam Slides	-
4 - °	8 - °	12 - °	16 - °	4 - °			

Mudança 2ª Pr./Cut-of		Almofada/Cushing	
12	mm	8,5	mm
Injecção / Injection			
1ª Pressão 1st Pressure	80 bar	Pr. Especifica Espec. Press	971 bar
Pr. Comutação Sw. Over Pr.	35 bar	Pr. Especifica Espec. Press	425 bar

Dosagem / Screw	
Curso de dosagem / Shot size	15
Final curso Dosagem / Final shot size	18,4
Atraso rotação fuso / Screw delay time	
Asp. antes / Decomp. before screw	
Asp. depois / Decomp. after screw	3

Perfil de injeção Injection Profile		Perfil pós-pressão Holding Pressure Profile		
Velocidade Speed	Curso Stroke	Pressão Hid. Hid. Pressure	Pressão Material Pressure Material	Tempo Time
1 80		60 bar	728 bar	0,3 seg
2 100	14 mm	45 bar	546 bar	5 seg
3	mm	5 bar	60 bar	0,1 seg
4	mm	bar	bar	seg

MM/S - %

Tempo Finais Ending Times	
Tempo de injeção Injection Time	0,18
Pausa de arrefecimento Cooling Time	17
Tempo de Ciclo Cycle Time	23

Velocidade de Dosagem / Screw Profile		
Nº passos da rotação Nº of screw speeds	Nº contrapressão Nº back pressure	Tempo dosagem Screw time
1	1	0,26
Velocidade Speed	Contrapressão Back Pressure	
100 rpm	5 bar	

Sopros / Air Blow	
Sopro / Air Blow 1	
Início sopro / Air blow start	mm
Fim sopro / End air blow	mm
Sopro / Air Blow 2	
Início sopro / Air blow start	mm
Fim sopro / End air blow	mm

Extracção / Ejection	
Extracção fim abertura / Ejector at clamp open	S
Extr. durante abertura / Ejector during opening	N
Ciclo extractor fora / Stop with ejector forward	N
Ciclos de extracção / Ejector cycles	2
Atraso na extracção / Ejector delay time	sec
Velocidade 1.ª extracção / 1 st ejection	5 % 15 mm
Velocidade 2.ª extracção / Following ejections	10 % 25 mm
Pressão extracção / Ejector pressure	60 bar
Retorno parcial extractor / Ejector partial returns	20 % 9,5 mm
Atraso no recuo extracção / Ejector return delay	sec
Velocidade recuo + cota / back speed + position	20 % 9 mm
Pressão recuo extracção / retract pressure	50 bar

Observações / Notes
VELOCIDADE ABERTURA Molde 15%
9 VERSÕES 131/122/123/126 130/127/128/125 124

Material Ref.: POM NAT	Empresa / Company: Fabricante / Toolma
Temperatura estufa / Drying 90 °C	EDILASIO
Tempo / Time: 4 hora/hours	Molde / Mould nº 6238
Operador / Machine Operator Pedreira	Data / Date 27/09/2017

