



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Cristina Fernandes da Silva

**Desenvolvimento e Aplicação do Método
Científico de Moldação por Injeção**





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Cristina Fernandes da Silva

Desenvolvimento e Aplicação do Método Científico de Moldação por Injeção

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)
Engenheiro Carlos Filipe Machado Bacelar Cardoso
Professor Doutor Júlio César Machado Viana

julho 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

No âmbito da Dissertação de Mestrado, quero agradecer a todas as pessoas e entidades envolvidas por todo o apoio e ajuda que proporcionaram ao longo de todo o processo.

Primeiramente quero agradecer aos meus pais e irmã por todo o apoio, paciência e ajuda ao longo destes 5 anos.

De seguida, quero agradecer ao meu namorado e amigos pela melhor companhia, nos melhores e piores momentos deste período e por todas as experiências vividas em conjunto. Sem dúvidas que foram fundamentais para tornar estes últimos anos de formação algo memorável e inesquecível.

Também quero agradecer aos orientadores Júlio Viana e Filipe Cardoso pelo ajuda e suporte para o desenvolvimento deste projeto.

Quero também deixar um agradecimento a todas as pessoas da empresa CS Plastic que foram incansáveis, em especial à Marta Silva, Leandro Brito, Goreti Silva, Eduardo Almeida, Cristiana Pinto e Luís Teixeira.

Um especial agradecimento à Alexandra Pereira, pela ajuda incansável que me proporcionou que foi fundamental para o meu projeto.

E por último, quero agradecer ao Engenheiro Paulo Pereira por toda a ajuda no domínio do programa Moldex.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio, nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Desenvolvimento e Aplicação do Método Científico de Moldação por Injeção

O projeto desenvolvido foca-se na área de moldação por injeção de plásticos e foi desenvolvido na empresa CS Plastic, em Santo Tirso, no âmbito da conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros realizado na Universidade do Minho.

A presente dissertação, baseia-se no estudo de otimização do processo de moldação por injeção através da aplicação dos conhecimentos científicos da área de injeção. A aplicação dos métodos científicos, tem o propósito de obter processos robustos e consistentes.

A primeira etapa deste projeto baseou-se no estudo e pesquisa preliminares sobre a temática do *Moldação por Injeção Científica*, e a seleção da peça que serviu de caso de estudo. Neste caso, o produto escolhido era recente na empresa e pode-se acompanhar todo o desenvolvimento do processo. Posteriormente, organizou-se a estrutura da dissertação, iniciou-se uma nova pesquisa sobre todas as ferramentas que se iriam aplicar e dos assuntos mais importantes da moldação por injeção, nomeadamente diagrama de Ishikawa, DOE, entre outros. Efetuaram-se, seguidamente, testes práticos para averiguar as características do processo e depois de todos os ensaios serem realizados, procedeu-se à análise de resultados acerca das variáveis que mais influenciavam o processo. Paralelamente a todo este processo, foram-se realizando simulações de enchimento onde também se procedeu à análise de todos os resultados para, por fim, se efetuarem comparações entre os resultados dos testes práticos com os das simulações no software Moldex 3D. No final, retiraram-se conclusões sobre as diferenças entre os diferentes resultados e acerca da influência das variáveis em estudo nas respostas do processo, e na importância da qualidade final do produto em estudo. Os resultados das simulações e dos testes experimentais mostram discrepâncias entre eles, porém ambos seguem a teoria da ciência de moldação por injeção, para obter um processo robusto e reproduzível, onde os principais fatores se basearam nos valores de 2ª pressão, velocidade de injeção e temperatura do fundido.

Palavras chave: Consistente, Moldação por Injeção Científica, simulações, testes práticos

ABSTRACT

Development and Application of Scientific Injection Moulding

This project was developed and focused on the field of injection moulding and was a collaboration with *CS Plastic*, based in Santo Tirso, Portugal, as the conclusion for master degree in polymer engineering from the University of Minho.

This dissertation, it's based in the study and optimization of the injection moulding process through the application of Scientific moulding, whose application has the objective of obtaining robust and consistent processes.

The first part of the project was aimed at the study and preliminary research of the theme of Scientific moulding and the selection of the part used as the case in study. In this case, the part selected was new in the company and it was possible to follow it throughout the whole process. Next, the structure of the dissertation was constructed and a new research was started about the tools necessary for the implementation of Scientific moulding and its importance. After these, practical tests were made to evaluate the process characteristics and after those tests were concluded, results were discussed about the variables that most impact the method. At the same time, filling simulations were made in order to compare both results, practical and simulations. The software used was *Moldex 3D*. Lastly, conclusions were obtained about the different results, the influence of the variables in the injection moulding process and the importance in the quality of the final product.

The results from the simulations and practical experiments show discrepancies, however both follow the scientific injection moulding theory in order to obtain a robust and reproducible process, where the main factors based basically on the values of the pack pressure, injection speed, and melt temperature.

Keywords: Consistency, Scientific Injection Moulding, simulations, practice tests

Índice

Agradecimentos	v
Declaração de integridade	vi
Resumo.....	vii
Abstract	viii
Lista de abreviaturas e Siglas	xiii
Índice de Figuras.....	xiv
Lista de símbolos	xvii
Índice de Tabelas.....	1
1. Introdução.....	2
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da dissertação	3
1.4 Apresentação de Empresa	4
2. Conceitos teóricos.....	5
2.1 Processo de injeção.....	5
2.1.1 Ciclo de moldação por injeção	6
2.1.2 Fases do ciclo de Injeção.....	7
2.1.3 Consistência do processo de moldação por injeção.....	8
2.2 Processo científico de moldação por injeção	11
2.2.1 Os 5 pilares do Processo de Moldação por Injeção	12
2.2.2 Condições do Processo	14
2.2.3 Etapas do SIM.....	17
3. Metodologias	19
3.1 Diagrama de Ishikawa	19

3.2	Plano de Experiências	21
3.2.1	Método de Taguchi	22
3.3	Moldex 3D	25
3.4	Design Expert	26
4.	Materiais e Métodos	26
4.1	Características da peça	26
4.1.1	Especificações do material.....	26
4.1.2	Dimensões da peça	28
4.2	Molde	31
4.2.1	Lado Injeção	33
4.2.2	Lado extração.....	35
4.2.3	Canal de Arrefecimento	36
4.2.4	Injeção da peça	38
4.3	Máquina de Injeção.....	40
4.4	Estudo da Otimização do Processo	41
4.5	Definição de variáveis e Planeamento de Experiências para o Projeto	52
4.5.1	Diagramas de Ishikawa	52
4.5.2	Planeamento de experiências do Projeto.....	54
4.6	Ferramentas Utilizadas em Testes Experimentais	57
5.	Resultados.....	58
5.1	Resultados 6 Passos	58
5.1.1	Curva de Viscosidade	58
5.1.2	Queda de Pressão	60
5.1.3	Janela de Processo	61
5.1.4	Solidificação do ataque	62

5.1.5	Determinação do Tempo de Arrefecimento.....	63
5.2	Análise de Resultados Simulações	64
5.2.1	Empeno	65
5.2.2	Variação de peso.....	74
5.2.3	Variação do Tempo de Ciclo	77
5.2.4	Análise e controlo de chupados.....	79
5.3	Análise de Resultados dos Testes Experimentais	82
5.3.1	Empeno	83
5.3.2	Variação do Peso das Peças	86
5.3.3	Variação do Tempo de Ciclo	88
5.3.4	Análise e Controlo de chupados	90
5.3.5	Cor e Acabamento	93
5.4	Confirmação	94
5.4.1	Simulações	94
5.4.2	Testes Experimentais	97
5.5	Comparações de resultados.....	98
6.	Conclusões	100
7.	Bibliografia	102
	104
8.	Anexo I- Ficha técnica	104
	Anexo 2- Curva PVT de ABS ELIX P2H-AT	105
	Anexo 3- Haijinj HF 3600	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIM	Scientific Injection Moulding
DOE	Design of Experiencies
Tg	Temperatura de transição Vitrea
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
MFI	Índice de Fluidez
CTE	Coeficiente de expansão térmica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura da dissertação	3
Figura 2- Empresa CS Plastic, sediada em Santo Tirso	5
Figura 3- Esquema representativo do ciclo de injeção; Adaptado de [2]	6
Figura 4- Consistência de cavidade para cavidade; Adaptado de [5]	9
Figura 5- Figura representativa da consistência de injeção para injeção; Adaptado de [5]....	10
Figura 6- Consistência de processo para Processo; Adaptado de [5]	10
Figura 7- Figura representativa dos 5 Pilares de Injeção; Adaptado de [10].....	13
Figura 8- Representação de dosagem; adaptado de [2]	16
Figura 9-Representação do Diagrama de Ishikawa.....	20
Figura 10- Metodologia DOE	22
Figura 11-representativa dos fatores do Método de Taguchi ; Adaptado de [20].....	23
Figura 12- Simulação de enchimento.....	25
Figura 13- Representação da peça em estudo em Solidworks	28
Figura 14-Peça montada na estrutura final à esquerda e parte da frente à direita.....	29
Figura 15-Desenho técnico da peça em estudo	29
Figura 16-Castelos e engates da parte de trás da peça	30
Figura 17-Engates e castelos da parte de trás da peça	30
Figura 18-Peça com marcas de engates e castelos muito acentuadas.....	31
Figura 19-Representação da estrutura do Molde em Solidworks	32
Figura 20- Lado da injeção do molde	33
Figura 21-Zona de escape de gases.....	34
Figura 22- Estruturas retângulas que auxiliam no ajuste do molde	34
Figura 23-Representação do lado de extração em Solidworks (à esquerda) e imagem do lado de extração do molde real (à direita).....	35
Figura 24-Lâminas Extratoras.....	36
Figura 25-Balancé.....	36
Figura 26-Sistemas de arrefecimento do lado de injeção do molde	37
Figura 27- Sistema de entrada e saída de água do lado de injeção conectado por mangueiras	37

Figura 28- Sistema de arrefecimento do lado de extração.....	38
Figura 29-Jito com 2 pontos de ataque.....	39
Figura 30-Representações dos pontos de ataque da peça	39
Figura 31- Ponto de Ataque	40
Figura 32-Efeito da taxa de corte na viscosidade representado numa escala linear; Adaptado de [6]	43
Figura 33- Procedimento para obtenção da Curva de Viscosidade	43
Figura 34- Procedimento para obter Balanceamento entre Cavidades	44
Figura 35- Exemplo de Gráfico de Balanceamento entre Cavidades.....	45
Figura 36- Procedimento para obtenção da Queda de Pressão	46
Figura 37- Gráfico Exemplo da Queda de Pressão	46
Figura 38- Gráfico Exemplo do Processo de Injeção.....	48
Figura 39- Procedimento para obter a Janela de Processo	48
Figura 40- Procedimento para Obtenção do Gráfico de Solidificação do Ataque	49
Figura 41-Gráfico Exemplo da Solidificação de Ataque	50
Figura 42- Procedimento para obtenção do gráfico de variação do tempo de Arrefecimento	51
Figura 43- Gráfico Exemplo de determinação de Tempo de Arrefecimento.....	51
Figura 44- Diagrama de Ishikawa do brilho.....	52
Figura 45- Diagrama de Ishikawa de Fragilidade	53
Figura 46- Diagrama de Ishikawa de Fragilidade	54
Figura 47- Balança Digital.....	57
Figura 48- Equipamento de metrologia	58
Figura 49- Gráfico com Curva da Viscosidade.....	59
Figura 50- Gráfico de Queda de Pressão.....	61
Figura 51- Janela de Processo	62
Figura 52-Gráfico de solidificação do ataque.....	63
Figura 53- Gráfico de determinação de tempo de arrefecimento.....	64
Figura 54-Percentagem de contribuição de cada um dos pontos de ataque (à esquerda) e linha de soldadura (à direita)	65
Figura 55-Gráfico de valores de empenos das Simulações.....	66

Figura 56- Empenos das simulações 2,3,5 e 8.....	67
Figura 57-Empenos das simulações dos ensaios 9, 12 14 e 15	67
Figura 58-Simulações dos ensaios 2 e 12	68
Figura 59-Empenos das simulações do ensaio 10.....	69
Figura 60-Empeno da simulação do ensaio 4	69
Figura 61-Simulações 6 e 16.....	70
Figura 62-Simulações 1,7 ,11 e 13.....	70
Figura 63-Efeito da temperatura do molde na variação de empenos.....	72
Figura 64- Efeito da 2ª Pressão no aparecimento de empenos.....	73
Figura 65-Efeito da Interação entre Temperatura do fundido e 2ª pressão no aparecimento de empenos.....	74
Figura 66- Variação do peso das peças simuladas em Moldex.....	75
Figura 67-Efeito da velocidade de injeção na variação do peso (simulações).....	77
Figura 68- Gráfico da variação do tempo de ciclo nas simulações	78
Figura 69-Efeito da velocidade de injeção na variação do tempo de ciclo (simulações)	79
Figura 70- Gráfico da variação e chupados nas simulações.....	80
Figura 71- Chupados nas simulações da peça 4 (à esquerda) e da peça (à direita)	81
Figura 72-Efeito da 2ª Pressão na variação de chupados (simulações).....	82
Figura 73- Empeno da peça do ensaio 11	83
Figura 74- Gráfico da variação de empeno nas simulações.....	84
Figura 75-Efeito da temperatura de extração na aparição de empenos (testes experimentais)	86
Figura 76- Variação do peso nos testes experimentais	87
Figura 77-Variação do tempo de ciclo nos testes experimentais	89
Figura 78-Chupados das peças dos ensaios 10 e 16	92
Figura 79- Queimados das peças dos ensaios 7 e 15	93

LISTA DE SÍMBOLOS

↑ Aumenta/ Aumento

↓ Diminui/ Diminuição

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Principais Variáveis do Processo	14
Tabela 2-Exemplo de matriz L4; Adaptada de [22]	24
Tabela 3- Condições de processamento do ABS ELIX	27
Tabela 4- Características da máquina de injeção.....	41
Tabela 5 - Variáveis e respectivos níveis.....	55
Tabela 6 - Plano de Experiências.....	56
Tabela 7- Valores de dosagem e ponto de comutação das zonas moldadas	60
Tabela 8- Condições Utilizadas nos testes experimentais e nas simulações	64
Tabela 9- Tabela ANOVA da variação de empenos (simulações)	71
Tabela 10-Tabela ANOVA da variação do peso (simulações)	76
Tabela 11-Tabela ANOVA de aparecimento de chupados (simulações).....	81
Tabela 12- Tabela ANOVA de variação de empenos (testes experimentais)	85
Tabela 13-Tabela ANOVA de variação do peso (testes experimentais).....	88
Tabela 14- ANOVA de variação do Tempo de Ciclo	90
Tabela 15-Análise do aparecimento de chupados em cada peça.....	91
Tabela 16- Medição da profundidade dos chupados mais acentuados	93
Tabela 17- Tabela de Confirmação da Variação dos Empenos nas Simulações	95
Tabela 18- Tabela e Confirmação da Variação do Peso nas Simulações	96
Tabela 19- Tabela de Confirmação Da variação de tempo de Ciclo nas Simulações.....	96
Tabela 20- Tabela de Confirmação da variação de Chupados nas simulações.....	97
Tabela 21- Tabela de Confirmação da variação de Empeno nos testes Experimentais	97
Tabela 22-Tabela de Confirmação de chupados nos testes experimentais	98
Tabela 23- Tabela de Comparação entre resultados das Simulações e testes Experimentais	99
Tabela 24- Tabela de processo ideal	100

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial é apresentado, de forma genérica, o projeto que se pretende desenvolver.

Inicialmente é explicada a relevância do projeto desenvolvido na dissertação, posteriormente determinam-se os objetivos da mesma, assim como a metodologia utilizada para os atingir.

Por fim, encerra-se este primeiro capítulo com a exibição da estrutura da dissertação e com uma breve apresentação da empresa onde foi desenvolvido todo o projeto.

1.1 Enquadramento

O mercado encontra-se em constante evolução e para a poder acompanhar, é necessário que as empresas pesquisem e implementem novas soluções que permitam o seu crescimento progressivo e, da mesma forma, impeçam a sua estagnação. Face à exigência existente a nível global, é necessário elaborar planos de trabalho que estimulem a produtividade e melhoria contínua de processos produtivos, atendendo às exigências dos clientes.

A moldação por injeção de plásticos contém um conceito simples. Traduz-se basicamente em “Fundir- Injetar- Arrefecer”, e quando se descobre como controlar a máquina responsável pelo processo, acaba-se por subestimar a complexidade do mesmo, e por essa razão, muitas empresas não atingem a consistência essencial para o sucesso do projeto e acabam por encerrar devido à ausência da eficiência exigida pelo mercado.

Uma vez que, atualmente, o processo de moldação por injeção é um dos métodos produtivos mais utilizado para a produção de peças plásticas, este deve ser analisado detalhadamente e compreendido na sua plenitude.

Nesse sentido acaba por surgir o projeto desenvolvido nesta dissertação de mestrado, que visa de que forma as variáveis influenciam a eficiência, qualidade, consistência e reprodutibilidade do processo de moldação por injeção.

Depois de entender toda a dinâmica do processo, é possível tomar decisões certas acerca da definição inicial de todos os parâmetros envolvidos no processo de injeção, a fim de estabelecer um processo robusto e eficiente na sua produtividade.

1.2 Objetivos

Como descrito anteriormente, o objetivo do projeto descrito na presente dissertação pretende entender de forma plena o processo de moldação por injeção e assim atingir os melhores resultados possíveis. Para isso é necessário estudar o papel das variáveis operatórias no processo, assim como, a contribuição da combinação das diferentes variáveis no mesmo. Os objetivos de todo o projeto passam por:

- Pesquisar e compreender sobre o conceito de Scientific Injection Moulding;
- Aplicar a metodologia DOE para determinar as condições de processamento que mais influenciam a qualidade e consistência do processo;
- Efetuar simulações de enchimento e testes experimentais para comprovar quais os efeitos das variações das condições de processamento;
- Comparar os resultados das simulações e dos testes experimentais;
- Concluir acerca das variáveis de maior relevância na consistência e qualidade do processo;

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação contém 6 capítulos. Na Figura 1 é representada a estrutura de todo o relatório.

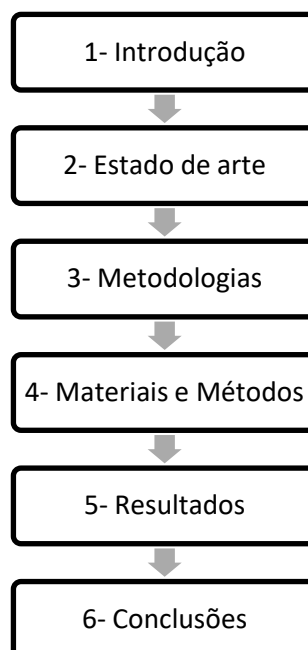


Figura 1- Estrutura da dissertação

Na introdução é enunciado o tema, elabora-se uma breve apresentação da empresa onde se desenvolve o projeto, e apresenta-se a estrutura de todo o relatório.

O estado de arte, diz respeito à introdução e explicação pormenorizado tema Scientific Injection Moulding, bem como de todas as vertentes que estão envolvidas neste projeto.

Nas metodologias é explicada toda a teoria por detrás dos métodos utilizados ao longo de toda a dissertação.

Em materiais e método são descritos todos os métodos e os instrumentos e acessórios necessários para todas as medições, pesagens e ações efetuadas durante todo o projeto. Posteriormente são aplicados os métodos e conhecimentos descritos nas metodologias, para obter as variáveis que se pretendem alterar nas experiências.

O capítulo dos resultados e análises dos resultados, testam-se todas as hipóteses e combinações (tanto no software como experimentalmente) obtendo-se resultados que são posteriormente analisados e comparados

Por fim, no capítulo das conclusões é efetuado um balanço sobre todo o projeto, onde se retiram conclusões sobre as experiências realizadas e o tema do projeto.

1.4 Apresentação de Empresa

A CS Plastic é uma empresa sediada em Santo Tirso, fundada em setembro de 2010, com cerca de 30 colaboradores, especializada na área da injeção de plásticos de elevada precisão.

Esta entidade trabalha para diversas vertentes, nomeadamente a médica, industrial, alimentar, eletrónica, desportiva, entre outras. Para além da injeção de peças a CS Plastic efetua vários serviços como o desenvolvimento de produtos, prototipagem, produção de moldes e de peças e gestão de projetos. A empresa destaca-se pela qualidade, competência, experiência e facilidade de comunicação em diversos idiomas, conquistando assim a confiança de empresas não só nacionais, assim como internacionais. O seu desenvolvimento e a produção de componentes termoplásticos dispõe de um Sistema de Gestão da qualidade reconhecido e conforme com a norma UNE-EN ISO 9001:2008 [1].



Figura 2- Empresa CS Plastic, sediada em Santo Tirso

2. CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 Processo de injeção

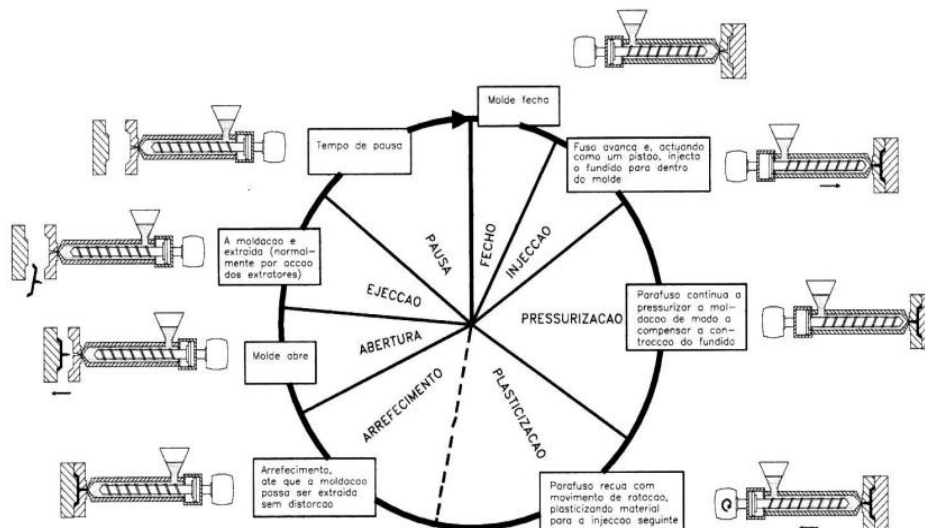
Atualmente, a moldação por injeção trata-se do principal processo de transformação de materiais poliméricos, tendo um papel de elevada importância em diversas áreas como médica, construção civil, embalagem, automóvel, entre outros [2] .

Moldação por injeção pode definir-se como o processo no qual um material plástico no estado sólido e em forma de granulado, é colocado no interior de uma tremonha e segue para a máquina de injeção, onde posteriormente é aquecido até plasticizar, para seguidamente ser injetado (sob pressão) para o interior da cavidade moldante, onde irá preencher a mesma, adquirindo a forma do produto que se pretende obter. Seguidamente o material arrefece recuperando a rigidez e depois ocorre a ejeção da moldação [3].

2.1.1 Ciclo de moldação por injeção

O processo de moldação por injeção engloba um conjunto de etapas e operações que ocorrem na máquina de injeção. Estas operações são cíclicas e ocorrem sempre ao fim de cada moldação. Na indústria dos plásticos, o objetivo passa por produzir peças que cumpram as especificações e condições impostas, no mínimo intervalo de tempo possível, tentando ao máximo rentabilizar o processo.

Na Figura 3, é possível observar-se as diversas fases do ciclo de injeção. Cada etapa tem um importante papel na qualidade do processo e cada uma delas depende da anterior, por essa razão é importante assegurar que o processo está estabilizado para não prejudicar a qualidade do mesmo e conseqüentemente do produto final [3].



CICLO DE MOLDAÇÃO DE TERMOPLASTICOS

Figura 3- Esquema representativo do ciclo de injeção; Adaptado de [2]

2.1.2 Fases do ciclo de Injeção

O ciclo de injeção é dividido em 6 etapas principais.

1. **Fecho e trancamento**

O ciclo inicia-se pelo fecho e trancamento do molde, este é realizado pelo sistema hidráulico que movimenta a placa móvel na direção da placa fixa. Esta etapa deve ser o mais breve possível. A velocidade de fecho corresponde ao avanço da placa móvel da injetora no momento que ocorre o fecho do molde. Esta deve ser ajustada de maneira que o encosto das duas partes do molde seja suave e assim evitar a danificação das superfícies. O tempo de duração desta operação é dependente do desempenho da máquina e das características do molde.

2. **Injeção**

Nesta etapa ocorre o avanço da unidade de injeção e o cilindro encosta o bico ao molde, o parafuso é empurrado para a frente, forçando a entrada do fluído para o interior da cavidade do molde. A velocidade de injeção deve conseguir alcançar um equilíbrio entre rapidez de preenchimento de cavidade e a correta replicação dos contornos do molde.

3. **Pressurização/compressão**

Após a fase de injeção, existe a necessidade de continuar a compactar o fundido. Geralmente, a quantidade de matéria-prima doseada para o interior da cavidade é ligeiramente superior do que o volume final do produto e o excesso de material leva a um aumento da pressão interna da cavidade. A 2ª pressão consiste na manutenção da pressão para minimizar a ação da contração da matéria-prima que pode ocorrer devido ao arrefecimento. A fase de compressão também é bastante importante para impedir o refluxo do fundido. Esta etapa cessa assim que o jito e /ou a própria peça estejam solidificados.

4. **Arrefecimento**

Imediatamente após a matéria-prima ser injetada para o interior da cavidade, a fase de arrefecimento inicia-se. O êmbolo é retraído por efeito da pressão criada pelo fundido devido à plasticização do material. Enquanto isto a moldação continua a arrefecer no interior do molde. No momento em que a plasticização está concluída, isto é, o volume pretendido está doseado, o fuso para. Esta etapa termina no

momento que a peça atinge uma temperatura que permite a sua extração sem existir distorção.

5. Abertura e ejeção

Assim que o tempo de arrefecimento acaba ocorre a abertura do molde e extração da peça. A velocidade e o curso de abertura devem ser selecionados consoante as dimensões gerais do molde e da peça.

6. Tempo morto

Corresponde ao período que decorre desde que a peça está pronta a ser extraída do molde e o a iniciação de um novo ciclo. A duração desta última etapa depende se a extração é feita em regime automático ou manual. No primeiro regime o tempo é praticamente instantâneo, mas em regime manual o tempo pode ser mais longo. Tempos mortos elevados naturalmente afetam negativamente a reprodutibilidade do processo.

Todas as etapas acima referidas desempenham um papel fulcral na qualidade do processo. É fundamental que todas as etapas ocorram corretamente, de forma a minimizar falhas que possam prejudicar a qualidade e a reprodutibilidade do processo [3], [4], [5].

2.1.3 Consistência do processo de moldação por injeção

Quando se está perante o desenvolvimento de um processo de injeção, procura-se sempre atingir a consistência e a robustez do processo. Um processo robusto não necessita de alterações, logo existe a redução de desperdício de material e de dinheiro, logo existe uma rentabilização do processo.

Um processo de moldação consistente origina produtos de qualidade consistente e previsível. Esta qualidade permite atingir a eficiência produtiva, que é na verdade o objetivo que se espera alcançar quando se desenvolve um processo de moldação. Perante a eficiência, não é necessário efetuar alterações no processo, uma vez que este não se encontra sensível a variações de causas comuns [6].

Na moldação por injeção existem 3 tipos de consistência.

A primeira é a **consistência de cavidade para cavidade**, representada na Figura 4, que é necessária em moldes de várias cavidades, onde a qualidade tem de ser igualmente alta para todas.

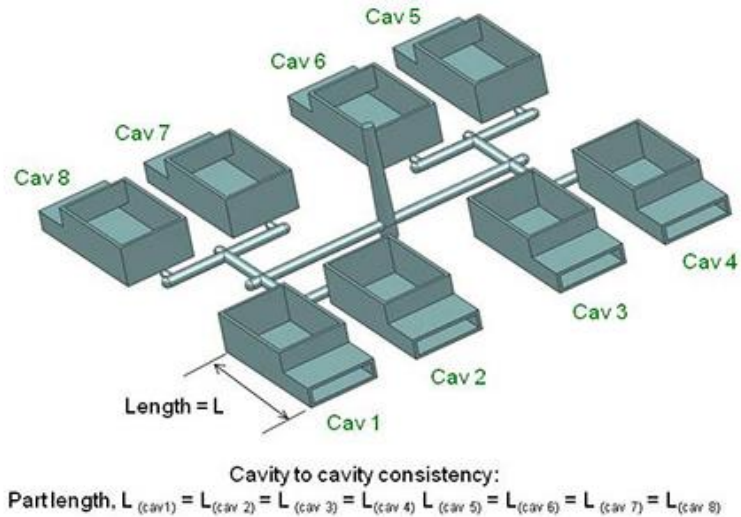


Figura 4- Consistência de cavidade para cavidade; Adaptado de [5]

Pode não ser possível alcançar esta consistência devido a vários fatores, como o facto de o aço da cavidade não ser idêntico, existir um desequilíbrio do fluxo reológico entre as cavidades, o tamanho do ataque e dos canais de alimentação não serem iguais para todas as cavidades, existir ventilação irregular e/ou insuficiente e o arrefecimento ser diferente para todas as cavidades.

Na **consistência de injeção para injeção**, as peças moldadas em cada injeção consecutiva são idênticas em qualidade, onde os parâmetros são iguais durante toda a produção.

The parts molded during every consecutive shots are identical in quality.

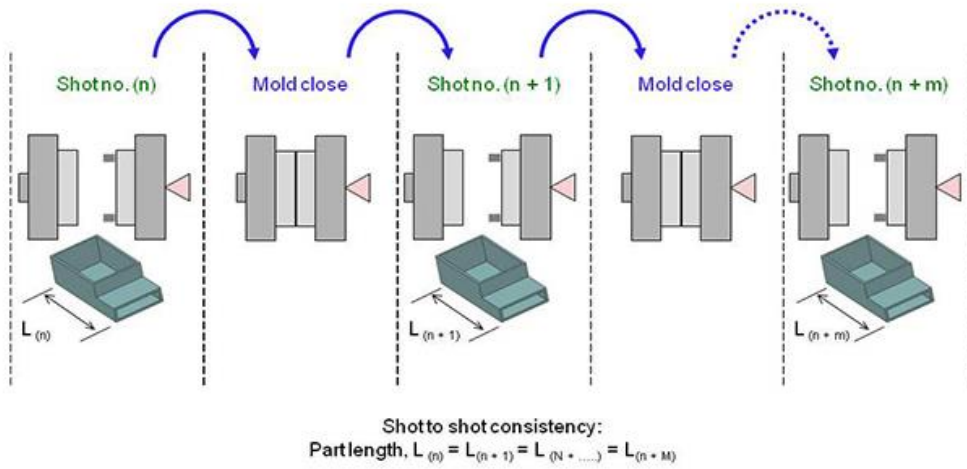


Figura 5- Figura representativa da consistência de injeção para injeção; Adaptado de [5]

Neste caso, a consistência não é atingida se os parâmetros do processo não são robustos, o processo não está otimizado, a máquina de injeção não está a transportar o fundido de forma consistente e se o design do molde ou da peça não estão otimizados.

Por fim, a **consistência de processo para processo** (Figura 6) trata-se de uma situação em que existem 2 processos distintos, mas são definidos pelos mesmos parâmetros de injeção.

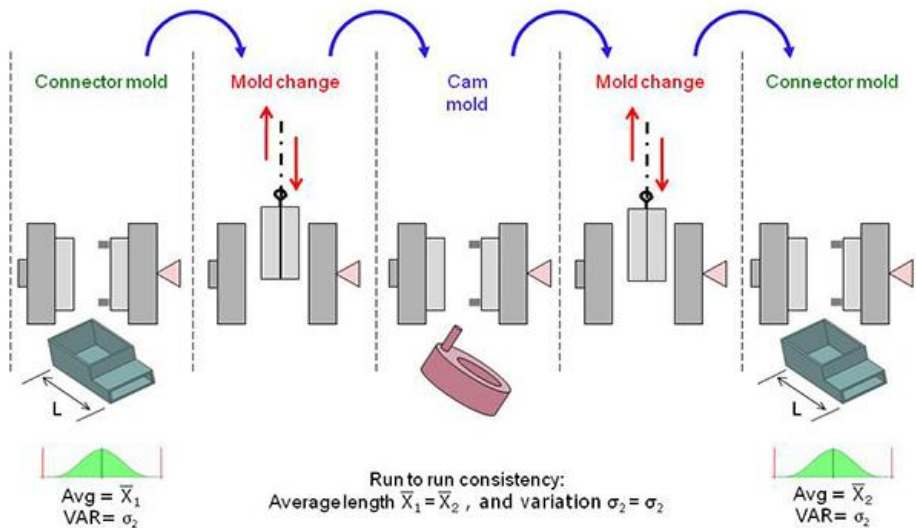


Figura 6- Consistência de processo para Processo; Adaptado de [5]

A consistência de processo para processo é prejudicada quando o processo não é robusto, a máquina de injeção não é consistente e /ou calibrada ou nem todos os parâmetros de moldação foram registados, e por isso, não há forma de os reproduzir[6],[7].

2.2 Processo científico de moldação por injeção

Os inputs da máquina de injeção (pressões, velocidades, temperaturas e tempos) definem o processo de injeção. Porém as diversas etapas que o material percorre são importantes para a qualidade e robustez do processo. Fases como a de armazenamento, secagem ou contração de material também podem ter uma grande influência na qualidade de obtenção de produtos com a qualidade requerida. Posto isto, a fim de conseguir controlar todo o processo produtivo, é extremamente necessário ter um conhecimento absoluto de todas as etapas envolvidas no mesmo. Um processo robusto proporciona a redução ou até eliminação de ajustes de processo, a redução da ocorrência de falhas através de um melhor controlo de fluxo, obtenção de uma maior consistência dimensional das peças, diminuição das micro paragens e compensação das variações de viscosidade de matéria-prima [6],[8],[9],[10].

Desenvolvida por John Bozelli e Rod Groleau, ***Scientific Injection Moulding***, trata-se de um método científico sistemático da moldação por injeção, cujo objetivo passa pelo desenvolvimento dos parâmetros de processo de injeção, a fim de conseguir uma otimização do mesmo através da redução tempos de ajustes de processo assim como do consumo do material. SIM, consiste em aplicar o conhecimento teórico acerca do processo de injeção, para obter um processo padronizado com peças de qualidade consistente.

Esta abordagem baseia-se, em grande parte, nos princípios científicos do comportamento dos plásticos, combinando-os com as variáveis controláveis, onde se desenvolve e se testa uma hipótese através de várias experiências, são retiradas conclusões e são facultados resultados reprodutíveis para poder eliminar problemas que estejam a comprometer a robustez do processo. Assim, o SIM engloba todas as etapas características de uma produção, lidando com o processo desde que o plástico entra sob a forma de granulado na máquina e sai da mesma como produto final. São utilizadas técnicas abrangentes de recolha e análise de dados a fim de desenvolver e documentar as especificações, configurações e etapas necessárias para criar

um processo de obtenção de peças injetadas minuciosamente controlado e reproduzível [6], [9]–[11].

2.2.1 Os 5 pilares do Processo de Moldação por Injeção

Um processo de moldação por injeção só é robusto se tiver em conta os pilares ou fatores críticos que caracterizam o processo de injeção que são:

- **Design da Peça**

O design do produto deve ser adequado ao processo de moldação por injeção, e deve seguir os princípios do projeto de peças em plástico, isto é, as peças devem ser dimensionadas tendo em conta as características do material, para assim diminuir ao máximo a ocorrência de defeitos e falhas.

- **Material**

Após os princípios preliminares do produto estiverem desenhados, deve proceder-se à escolha do material. Este deve ser selecionado de forma a corresponder à qualidade e tolerâncias requeridas pelo cliente. O próprio design da peça pode exigir um material ou aditivo específico para a finalidade do produto. Para além disso, o material deve ser compatível com o equipamento (neste caso a máquina de injeção).

- **Construção e Design do Molde**

O design do molde deve promover a localização ideal do ataque, canais de alimentação e arrefecimento. A construção do molde deve ser robusta para poder proporcionar uma janela de processamento ampla, onde consiga suportar o processo de injeção e o próprio material plástico. O molde deve ser construído tendo em conta todas as características individuais do material utilizado para a concessão da peça.

O desgaste do molde também deve ser tido em conta, uma vez que, a escolha do material do molde afeta diretamente o tempo de vida do mesmo, sendo então necessário também uma manutenção regular para assegurar a produção contínua.

- **Máquina de injeção**

A capacidade de injeção das máquinas de injeção deve ser proporcional ao volume da zona moldante dos moldes, de forma a não alterar a consistência da qualidade dos

produtos. Para além disso, devem colocar-se moldes com dimensões proporcionais à tonelagem das máquinas para evitar danificações nos mesmos.

A máquina deve também ser adequada ao tipo de material que se pretende utilizar.

O tempo de residência do material no interior do cilindro da máquina de injeção deve ser inferior ao tempo de residência máximo recomendado para o material.

- **Processo de injeção**

Mais uma vez, o processo de injeção deve ser robusto, consistente e reprodutível. Para que esta última etapa ocorra sem contratempos, é necessário que as anteriores sejam corretamente desenvolvidas. Não podem existir imperfeições no molde e o material tem de assegurar as especificações, por isso, este tem de estar isento de contaminações e humidades que prejudiquem o seu processamento [6],[12], [13].

Na Figura 7, estão representados todos os 5 pilares do processo de injeção. Como se pode ver, todos os pilares estão relacionados entre si e todos contribuem para o alcance de um processo e conseqüentemente, produto com qualidade.

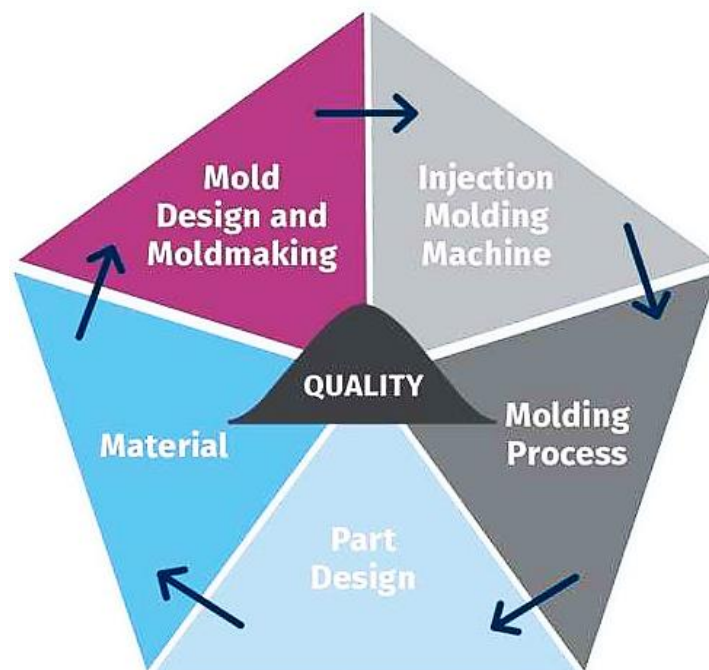


Figura 7- Figura representativa dos 5 Pilares de Injeção; Adaptado de [10]

2.2.2 Condições do Processo

O processo de moldação por injeção envolve um vasto conjunto de condições que influenciam o processo. Estas condições dividem-se em parâmetros de processo e variáveis operatórias.

Parâmetros do processo: Tratam-se dos aspetos geométricos/ construtivos idealizados no projeto de peça, molde e/ou equipamento. Como estes são decididos na fase de projeto de peça/ molde e seleção de equipamento, o operador não tem capacidade interventiva nos parâmetros. A capacidade da máquina, as dimensões do bico, a geometria de moldação (volume, espessura, comprimento de fluxo), sistema de alimentação e distribuição de temperaturas na superfície moldante. São os parâmetros mais importantes do processo.

Variáveis operatórias: Estas podem ser manipuladas diretamente pelo operador, através do ajuste do sistema de controlo da injetora ou de dispositivos auxiliares. Cada variável pode ser enquadrada numa das 5 principais: temperatura, velocidade, tempo, pressão e curso [2],[14]. As principais variáveis estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1- Principais Variáveis do Processo

Variáveis do processo				
Temperatura	Velocidade	Tempo	Pressão	Curso
Molde	Injeção	Arrefecimento	-	Almofada
Fundido	Rotação do Fuso	Pressurização	2ª Pressão	Dosagem
Cilindro	Recuo do Fuso	Fecho do molde	Contra-Pressão	Comutação
Ambiente	Abertura do molde	Abertura do molde	Bico	Descompressão
	Fecho do molde			Abertura do molde

- **Perfil de temperaturas do cilindro**

O perfil de temperaturas deve ser adequado à estrutura do material, da geometria do parafuso e do tipo de impressão a preencher. É necessário alcançar uma temperatura

suficientemente elevada para garantir a perfeita plasticização de todo o material, mas ao mesmo tempo impedir que exista degradação do mesmo.

- **Temperatura do molde**

A temperatura do molde influencia fortemente o processo de injeção, uma vez que, condiciona o tempo de arrefecimento. Como o tempo de arrefecimento ocupa grande parte do ciclo de moldação, este é bastante importante. Temperaturas muito elevadas aumentam o tempo de ciclo, uma vez que é necessário mais tempo de arrefecimento, porém, temperaturas muito baixas podem levar ao arrefecimento prematuro do material na fase de enchimento, o que provoca peças com elevadas tensões residuais ou até moldações incompletas.

- **Velocidade de injeção**

A velocidade de avanço do fuso durante a fase de enchimento da impressão é a velocidade de injeção. Trata-se do caudal com que o material é injetado. Esta variável é determinante no processo, uma vez que, velocidades elevadas são necessárias para garantir a baixa viscosidade do fundido, minimizar as perdas de calor durante a fase de enchimento e permitir a elevada dissipação viscosa no escoamento. Porém, se a velocidade for excessivamente alta, pode prejudicar a peça devido à maior probabilidade de ocorrerem defeitos.

- **2ª Pressão**

Podendo ser denominada como 2ª pressão, pressão de manutenção, pressurização ou pós pressão, esta corresponde à pressão exercida na moldação após o enchimento. É exercida após o enchimento, de forma a compensar a contração volumétrica que o material sofre durante a fase de arrefecimento.

A passagem da fase de enchimento da cavidade (fase dinâmica) para a fase de pressurização é chamada de comutação. Existem 3 formas de esta transição ser efetuada.

- **Por tempo:** Nesta forma, a comutação é efetuada após um tempo estabelecido, mesmo que o fuso ainda não tenha percorrido o curso que se pretende.

- **Por curso:** A comutação ocorre quando o fuso alcança a posição estabelecida pelo operador.
- **Por pressão:** A comutação é feita a partir de um valor estabelecido pelo operador que deve corresponder ao momento em que a impressão esta completa. Para esta prática é requerido a instalação de sensores de pressão na zona moldante.

- **Tempo de 2ª Pressão**

Corresponde ao período que a 2ª pressão é aplicada, ou seja, tempo que o fuso exerce pressão à moldação.

- **Contra Pressão**

Na fase de plasticização, durante a fase de recuo do fuso o material é forçado a deslocar-se para a frente do mesmo, exercendo uma força que se opõe ao fuso, denominada contra-pressão. Valores de contra-pressão maiores permitem uma plasticização mais longa e intensa, mas também um maior esforço mecânico sobre o material, o que garante um fundido mais homogêneo e com maiores temperaturas.

- **Dosagem**

Corresponde ao curso de material plasticizado (volume de moldação e almofada), Figura 8.

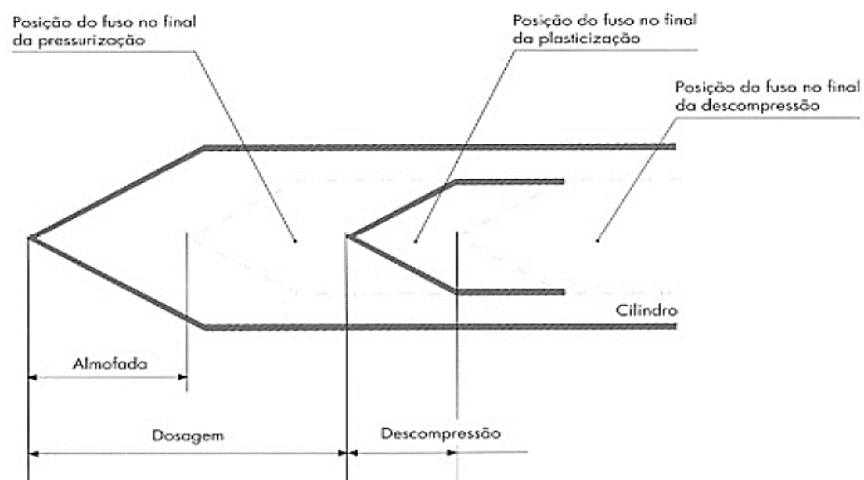


Figura 8- Representação de dosagem; adaptado de [2]

- **Curso de descompressão**

Recuo linear do fuso de modo a evitar a purga pelo bico de injeção. O curso de descompressão permite a sucção do fundido e o alívio de pressão no mesmo.

- **Almofada**

A almofada corresponde à quantidade de material a jusante do fuso de injeção após a fase de pressurização.

- **Tempo de arrefecimento**

A partir do momento que o fundido entra em contacto com as paredes do molde, inicia-se o arrefecimento do polímero. Porém o tempo de arrefecimento trata-se do período após a pressurização até que a moldação atinja uma temperatura adequada à extração da peça sem distorção.

- **Força de fecho**

Força exercida pela unidade de fecho da máquina de injeção, para manter o molde fechado, que deve ser sempre ligeiramente superior à força exigida pela moldação.

2.2.3 Etapas do SIM

SIM conhecido como moldação desacoplada, uma vez que os estágios chave do processo de injeção (preenchimento e pressurização) são analisados de forma independente.

A vertente do **Scientific Injection Moulding** envolve também estudo de reologia assim como o estudo da variação de pressão, a variação de temperaturas entre muitos outros aspetos.

Esta é uma técnica completa, abrangente e exclusiva para cada aplicação complexa, mas pode ser dividida em 6 etapas essenciais.

1º Passo: Análise do Projeto e Recomendação de Aplicação do SIM

Na fase inicial de análise da peça e da sua complexidade, é recomendado a aplicação do SIM se apropriado. Aplicar os princípios do **Scientific Injection Moulding** requer conhecimento especializado na área dos polímeros e da moldação por injeção.

2º Passo: Design e Ferramentas

O sucesso da aplicação do **SIM**, depende dos dados recolhidos. Para poder obter resultados precisos ao longo do processo, tanto a peça como as ferramentas (máquina, molde, entre outros) devem ser projetadas de forma a acomodar sensores de modelação científica. Por exemplo, a máquina de injeção tem de ser capaz de demonstrar os dados relativos ao processo, dosagem, valores de pressões, tempos, etc.

3ª Passo: Ferramenta de Construção

Após concluir o projeto de peça e do molde e depois de se aprovarem as especificações iniciais, constrói-se o primeiro modelo do molde. Este é testado de forma rigorosa para poder evidenciar erros funcionais preliminares, de forma a aplicar os ajustes necessários.

4º Passo: Estabelecimento da Janela de Produção

Testar a ferramenta trata-se da parte fulcral da moldação científica.

Um conjunto de testes e hipóteses, conhecido como Design of Experiences (DOE) permitem determinar quais são os principais parâmetros (velocidade de injeção, temperatura de fusão, temperatura do molde, tempo de arrefecimento, etc.) que influenciam o processo de injeção. Estes mesmos parâmetros, quando aplicados da forma consistente produzem resultados com a qualidade requerida.

5º Passo: Produção e monitorização

Depois de a janela do processo estar estabelecida, podem ser efetuados ajustes dimensionais finais e pode iniciar-se a produção em escala. A janela de processos é monitorização de perto e permanece constante durante toda a produção.

6º Passo: Manutenção

A manutenção adequada do molde e dos seus acessórios prolonga a vida útil dos mesmos, diminui a necessidade de ajustes e acaba por evitar tempo de inatividade, diminuindo também a ocorrência de peças com defeitos [15].

3. METODOLOGIAS

3.1 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa trata-se de uma ferramenta da qualidade, que tem por objetivos encontrar, organizar, classificar, documentar e exibir sob a forma de gráfico as causas de um determinado problema, agrupados por categorias para facilitar o brainstorming de ideias e análise da ocorrência.

Visto que as causas são hierarquizadas, torna-se possível identificar de forma concreta e rigorosa as causas do problema [16].

O diagrama de Ishikawa segue o princípio de que para cada problema existe um número limitado de causas primárias/principais, secundárias, terciárias e assim sucessivamente[7].

No processo de injeção, as causas que levam ao problema são agrupadas em 6 categorias: método, molde, máquina, mão de obra, matéria-prima e processo.

- **Método**

Processos, procedimentos e métodos utilizados durante a experiência pode influenciar a ocorrência de um problema. Nesta etapa, verifica-se como a forma de trabalhar afeta o surgimento de problemas no produto final.

- **Molde**

Aqui é necessário ter em conta todos os problemas relacionados ao design, maquinação e performance do molde.

- **Máquina**

Nesta categoria considera-se as causas originadas de falha na maquinaria usada durante o processo, como por exemplo funcionamento incorreto, falhas mecânicas, entre outros.

- **Processo**

As variáveis utilizadas no processo, são bastante importantes para a qualidade do mesmo. Posto isto, é necessário perceber a nível de processo quais os erros que irão contribuir diretamente para o surgimento de problemas/defeitos na peça final.

- **Mão de obra**

As atitudes, dificuldades e desempenho das pessoas também afetam diretamente a aparição de complicações no processo de injeção. A pressa, imprudência, falta de qualificação e competência fazem a diferença entre um processo bem-sucedido e um sem qualidade.

- **Matéria-Prima**

A qualidade, as misturas, as quantidades de matéria-prima também são fatores determinantes na qualidade do processo. A gestão da matéria-prima tem de ser algo bem ordenado e isento de erros (por exemplo: mistura de materiais incompatíveis) porque a qualidade da peça também é definida por isso.

Na Figura 9, está representada estrutura de um diagrama de Ishikawa, onde se apresenta o diagrama base do processo de injeção.

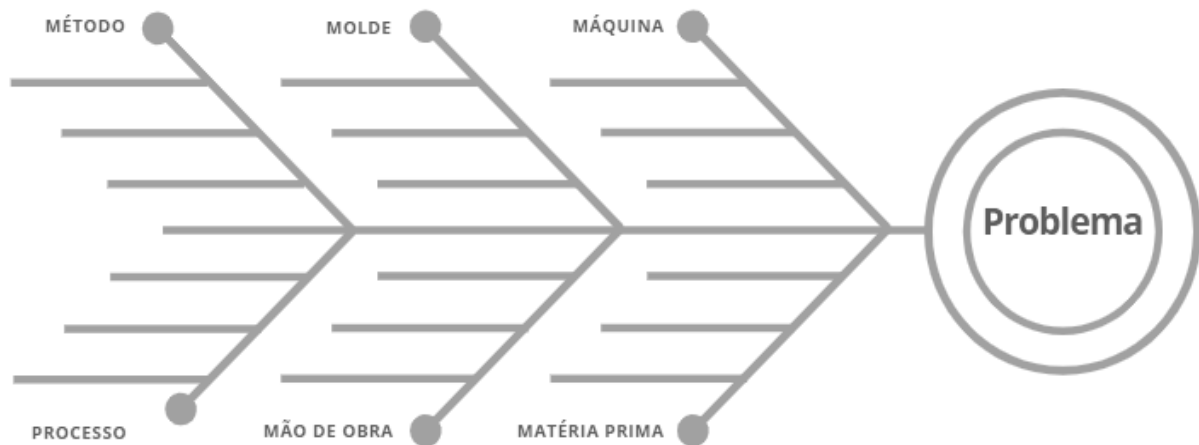


Figura 9-Representação do Diagrama de Ishikawa

3.2 Plano de Experiências

O planejamento de experiências (DOE), trata-se de uma técnica eficiente, utilizada para planejar experiências, isto é, a partir deste método é possível definir que dados, quantidades e condições devem ser recolhidos dados durante uma experiência. Permite então, investigar múltiplos fatores de processo, usando um número mínimo de experiências. É uma técnica bastante importante para a indústria uma vez que a sua aplicação permite resultados confiáveis, mas também economizar tempo e dinheiro, o que é bastante benéfico para o processo [16],[17].

A aplicação desta técnica é bastante importante no desenvolvimento de novos produtos, onde uma qualidade superior dos resultados dos testes permite a obtenção de um projeto com melhor desempenho relativamente às suas características funcionais e à sua robustez.

Para a aplicação da técnica do DOE, é essencial definir um objetivo e selecionar as características que têm influência no processo, assim como, definir os níveis e os fatores em questão. Após os níveis e fatores estarem definidos, é necessário iniciar a fase estatística. Esta consiste em combinar as variáveis do processo em matrizes ortogonais de forma a planejar as experiências.

Seguidamente, são efetuadas as experiências e após estas serem finalizadas os resultados podem finalmente ser analisados. Consoante os resultados, podem ser aplicadas retificações para melhorar o processo[18],[19] .

Na Figura 10, está representada a metodologia de DOE

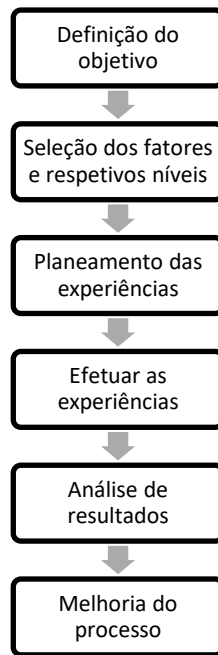


Figura 10- Metodologia DOE

A aplicação desta metodologia prevê um planeamento cuidadoso, uma programação de experiências ponderado, e uma análise de resultados qualificada. Dr. Genechi Taguchi padronizou métodos para as etapas de aplicação do DOE, desta forma, o DOE (usando a abordagem Taguchi) tornou-se uma ferramenta muito usada na engenharia [18].

3.2.1 Método de Taguchi

O método de Taguchi é o método de DOE mais utilizado pois, é simples e ajuda na obtenção de produtos de qualidade a um preço menor. Com este método, apenas uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada é realizado, o que permite minimizar custos e facilitar o acesso às informações necessárias. Posto isto, são realizadas matrizes ortogonais e tabelas triangulares para definir os testes que devem e podem ser efetuados. Este método pertence à categoria dos métodos classificados como “fora-de-linha”, por serem de utilização exterior à linha de produção, contrariamente aos métodos “em-linha” que, efetuam o controlo durante a fase produtiva. O método de Taguchi pode, desta forma, intervir desde a fase de conceção do produto [20].

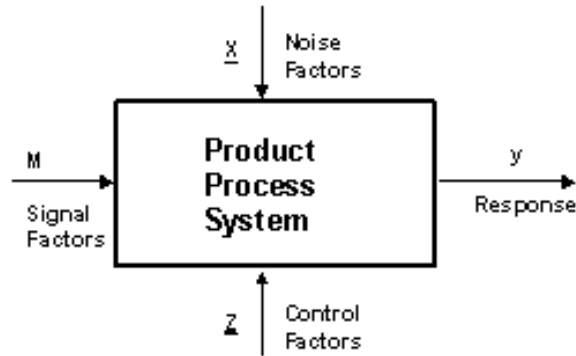


Figura 11-representativa dos fatores do Método de Taguchi ; Adaptado de [20]

O diagrama torna-se obrigatório para o desenvolvimento de projetos. Trata-se de uma forma de definir, de forma sucinta, o objetivo da aplicação do método.

- **Fatores de controlo (inputs):**

Tratam-se das variáveis que influenciam significativamente certas características do processo o produto, ou seja, são variáveis intrínsecas ao processo. São variáveis independentes e são facilmente controláveis.

- **Resposta (outputs):**

Características de qualidade do produto que podem ser medíveis e em que a sua variação possui um efeito crítico na qualidade final do produto. Exemplos: peso, custo, espessura, entre outros.

- **Fatores de Ruídos/ perturbação:**

Fatores que não podem ser controlados, ou o seu controlo implica gastos muito dispendiosos, e estão “além” do processo. Estes podem ser classificados como internos ou externos.

- **Fatores de ruído internos:**

São alterações que ocorrem quando um produto se deteriora durante o armazenamento. Exemplos de fatores de ruído interno são os materiais ou o operador.

Fatores de ruído externos:

Dizem respeito aos fatores ambientais como temperaturas, humidade, ou outras condições de uso que possam prejudicar as funções do produto.

O primeiro passo do método de Taguchi é a determinação do problema e/ou qual o objetivo do estudo em desenvolvimento. O passo seguinte consiste na determinação de qual a resposta que pode ser otimizada.

Depois de definida a resposta é necessário determinar qual a característica de qualidade que melhor se adequa à resposta e ao estudo. O passo seguinte passa pela identificação de fatores de ruído que tenham um possível impacto negativo no rendimento do sistema ou na própria qualidade.

Seguidamente, procede-se à escolha da matriz de experiências e à definição do procedimento de análise de dados. A matriz selecionada tem de satisfazer o número de graus suficiente para os parâmetros e respetivos níveis.

Um exemplo pode ser a Tabela 2. Existem 3 parâmetros, com 2 níveis cada, logo é necessária uma matriz $L_4(2^3)$, onde $L_{\text{experiências}}(\text{Níveis}^{\text{fatores}})$.

Uma matriz L_4 tem as características representadas na Tabela 2

Tabela 2-Exemplo de matriz L_4 ; Adaptada de [22]

Exp.	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

- 3 fatores: (A, B, C)
- 4 experiências: (1, 2, 3, 4)
- 2 Níveis: (1, 2)

Neste caso em específico, na eventualidade de não se aplicar este método, seriam necessários 8 ensaios para obter os mesmos resultados, logo, Taguchi ajudou a reduzir o número de experiências para metade das que seriam de esperar.

Após definida a matriz, passa-se à fase de realização de ensaios e o registo dos respetivos resultados. Pode ser realizado apenas um ensaio para cada combinação paramétrica ou, consoante o número de parâmetros de ruído, podem ser efetuadas várias repetições.

Depois de todas as experiências serem efetuadas, é necessário fazer a análise dos resultados, calculando o efeito das interações no processo.

Para aplicar medidas de melhoria, é necessário efetuar testes de estudo para otimização do processo [21],[20],[22].

3.3 Moldex 3D

O software Moldex 3D R16, trata-se de uma ferramenta 3D de engenharia assistida por computador com elevada capacidade analítica assim como elevada precisão de cálculo.

Este programa, através de simulações bastante pormenorizadas, permite visualizar a versatilidade do processo de injeção, perceber os principais erros/defeitos que podem ocorrer durante a injeção da peça e ajudar a otimizar o design do produto em questão. Para além disso, cede as principais soluções que se podem aplicar de forma a otimizar o processo e assim maximizar o retorno do investimento efetuado[23].

Para este estudo de comparação entre o caso real e as simulações, inserem-se no software os parâmetros que se pretendem variar e recolhem-se os resultados, onde se verificam os possíveis defeitos, como os empenos, chupados, entre outros.

No caso da Figura 12, é representado um exemplo de simulação de enchimento da peça, onde se afere o tempo de enchimento da mesma.



Figura 12- Simulação de enchimento

3.4 Design Expert

O programa Design- Expert fornece ferramentas para efetuar experimentos no processo, mistura e/ou combinações de fatores e componentes.

É possível efetuar triagem de fatores com mais influência, caracterizar interações e obter configurações de processo e receitas de produtos ideais.

Este programa permite facilmente aplicar ferramentas poderosas de teste e sobrepor todas as respostas de forma a obter o "ponto ideal" atendendo todas as especificações [24].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Características da peça

4.1.1 Especificações do material

A peça em estudo é uma peça em Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), mais propriamente ELIX ABS P2H-AT, branco com acabamento de alto brilho.

Este tipo de ABS trata-se de um material de fluxo intenso, anti estático de alto brilho e com boa resistência à humidade. A sua aplicação abrange produtos na área da eletrónica, eletricidade, entre outros.

Na Tabela 3, apresentam-se algumas das condições de processamento mais importantes do material ABS ELIX. No anexo 1 é apresentada a ficha técnica do material.

Tabela 3- Condições de processamento do ABS ELIX

Condições de Processamento	Valor	Unidades
Densidade	1,050	g/cm^3
MFI	37	$cm^3/10\text{ min}$
Contração	0.4 - 0.6	%
CTE (23 a 55°C)	$0.9 \cdot 10^{-4}$	1/ K
Temperatura de bico	220 - 240	°C
Temperatura de desumidificação	80	°C
Tempo de desumidificação	3 - 4	horas
Temperatura de fundido	210 - 240	°C
Temperatura do molde	50 - 70	°C
Temperatura de Extração	70	°C

Antes de ser processado, o ABS necessita de ser previamente desumidificado, durante um período de 3 a 4 horas, e uma temperatura constante de 80 a 90°C. Este tratamento, permite que o polímero liberte as moléculas de água presentes, e que as suas propriedades mecânicas não sejam diminuídas.

4.1.2 Dimensões da peça

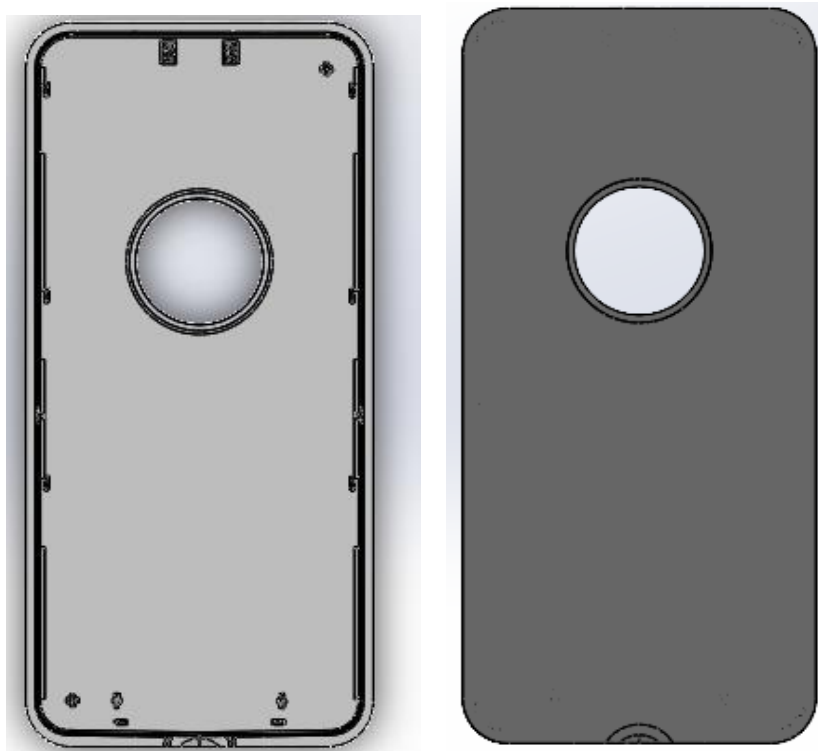


Figura 13- Representação da peça em estudo em Solidworks

Possui 223x471x3 mm de dimensões, logo é uma peça de espessura normal para injeção e com um tamanho considerável. Neste caso, a peça em estudo estará completamente visível ao consumidor e terá de encaixar em peças adjacentes como observável na Figura 14.



Figura 14-Peça montada na estrutura final à esquerda e parte da frente à direita

Na Figura 15, está representado o desenho técnico do produto.

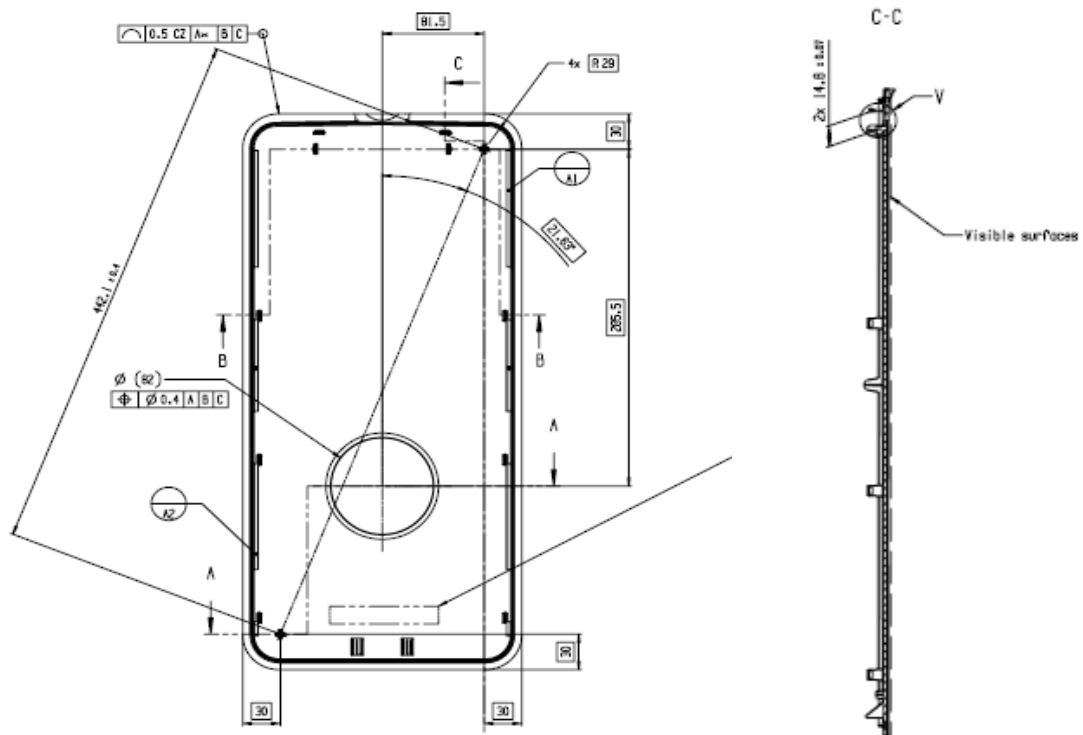


Figura 15-Desenho técnico da peça em estudo

Como mostram as Figura 16 e Figura 17, este produto contém vários engates na parte de trás, para proporcionar o seu encaixe na estrutura final. Este não podem conter qualquer tipo de empeno, para não comprometer a montagem.

Neste caso, a peça possui uma geometria complexa e depende de peças adjacentes, logo a necessidade de obter um processo robusto aumenta.

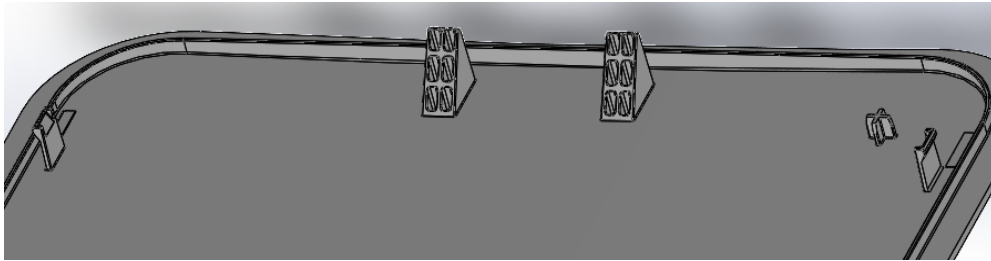


Figura 16-Castelos e engates da parte de trás da peça



Figura 17-Engates e castelos da parte de trás da peça

É necessário estabelecer corretamente as variáveis do processo para que os engates, castelos, entre outros não apareçam marcados na parte frontal da peça (como é observável na Figura 18), pois se isto ocorrer, esta é automaticamente descartada.



Figura 18-Peça com marcas de engates e castelos muito acentuadas

4.2 Molde

O molde trata-se de é uma ferramenta, capaz de permitir a enformação do material injetado na zona moldante. Genericamente, o molde é constituído por duas partes, divididas pela linha de partição, que se ajustam, estabelecendo a impressão com a geometria da peça que se pretende adquirir. As duas metades são compostas pela parte fixa com a cavidade e a parte móvel com a bucha.

O molde da peça em estudo trata-se de um molde de 3 placas de canais mistos em aço temperado.

Na Figura 19, está representada a estrutura do molde em Solidworks, com todas as placas e acessórios utilizados no mesmo. O molde possui dimensões de dimensões de 492X692 mm e uma altura total de 573 mm.

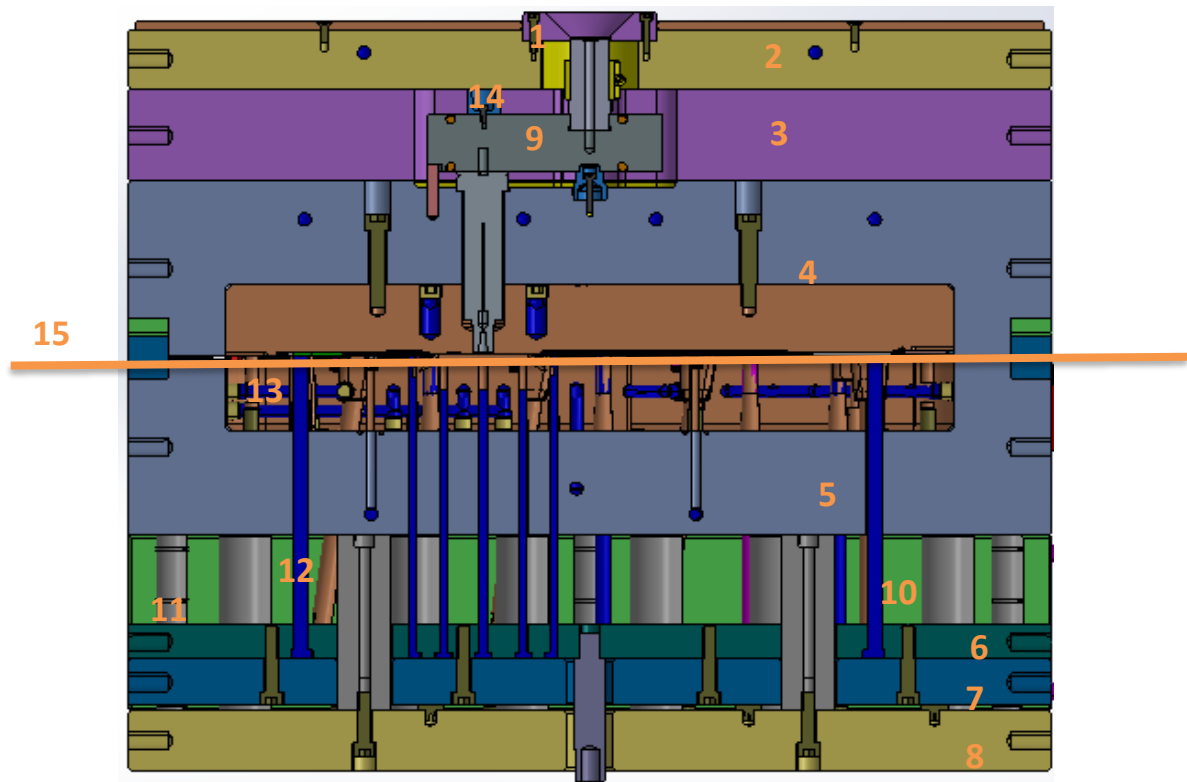


Figura 19-Representação da estrutura do Molde em Solidworks

Em que:

1-Anel de Centragem

2- Placa Base Superior

3- Placa auxiliar

4- Placa da Cavidade

5- Placa da Bucha

6- Placa Porta Extratores

7- Placa extratora

8- Placa Base inferior

9- Canal Quente

10- Calço

11- Coluna Guia

12- Extrator

13- Canal de Arrefecimento

14- Bucha de Injeção

15-Linha de Partição

4.2.1 Lado Injeção

A injeção da peça é efetuada pela técnica de injeção contra extratores. Os extratores (lâminas extratoras) auxiliares no processo de injeção, estão colocados do lado da extração. A zona da injeção é espelhada (representada na Figura 20), de maneira a proporcionar o acabamento brilhante e impecável exigido pelo cliente.

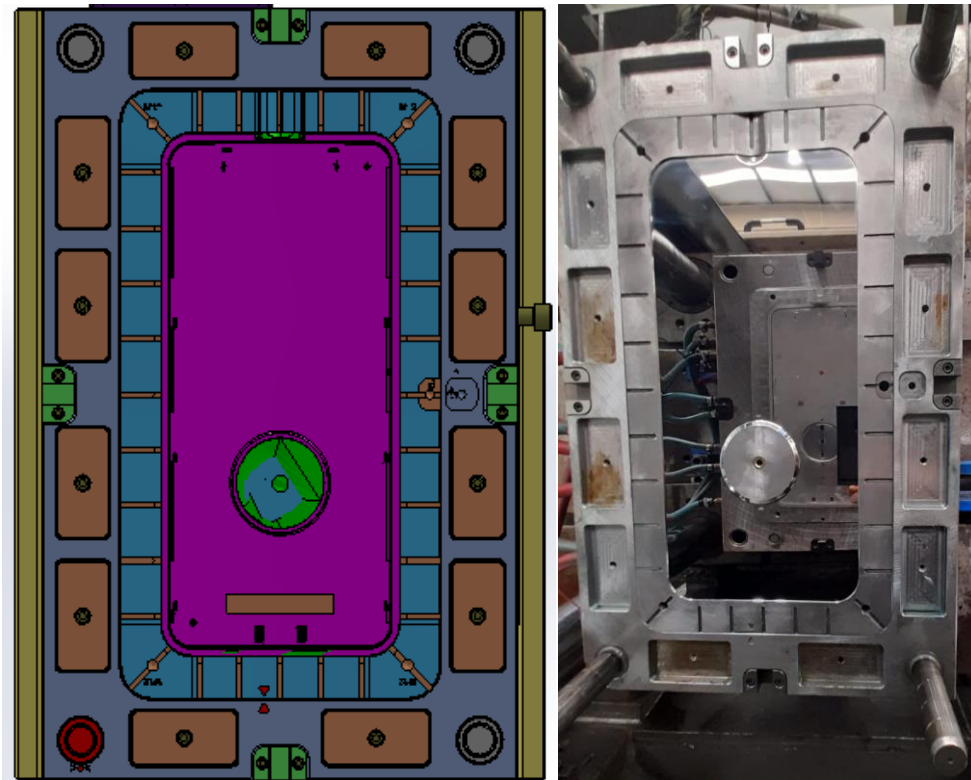


Figura 20- Lado da injeção do molde

Esta parte do molde contém também uma zona de escape de gases, representado na Figura 21, de forma a eliminar prisões de ar ou gases retidos na frente do fluxo do material durante o enchimento da peça que podem provocar defeitos adversos.

Posto isto, na maior parte dos casos, o ar e os gases provenientes do material saem pela zona de partição do molde. Porém, em alguns casos, este método pode não ser muito plausível, quando é fundamental uma grande precisão no ajustamento das duas partes do molde, como é o caso deste projeto.

Assim, na zona de injeção, são observáveis estruturas retangulares com profundidade de 2 mm, representado na Figura 22, cuja função é ajudar no ajuste das duas partes do molde com o intuito de evitar a danificação do mesmo.

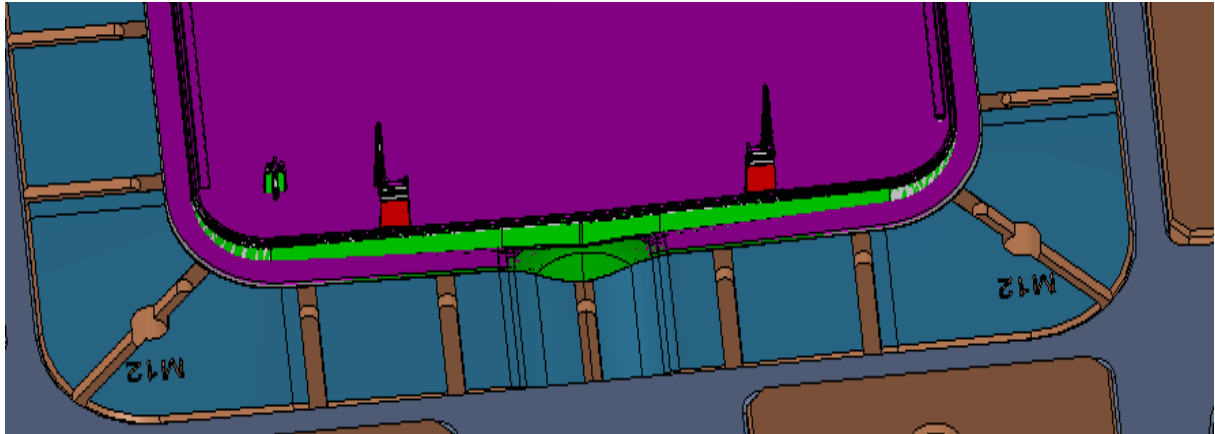


Figura 21-Zona de escape de gases

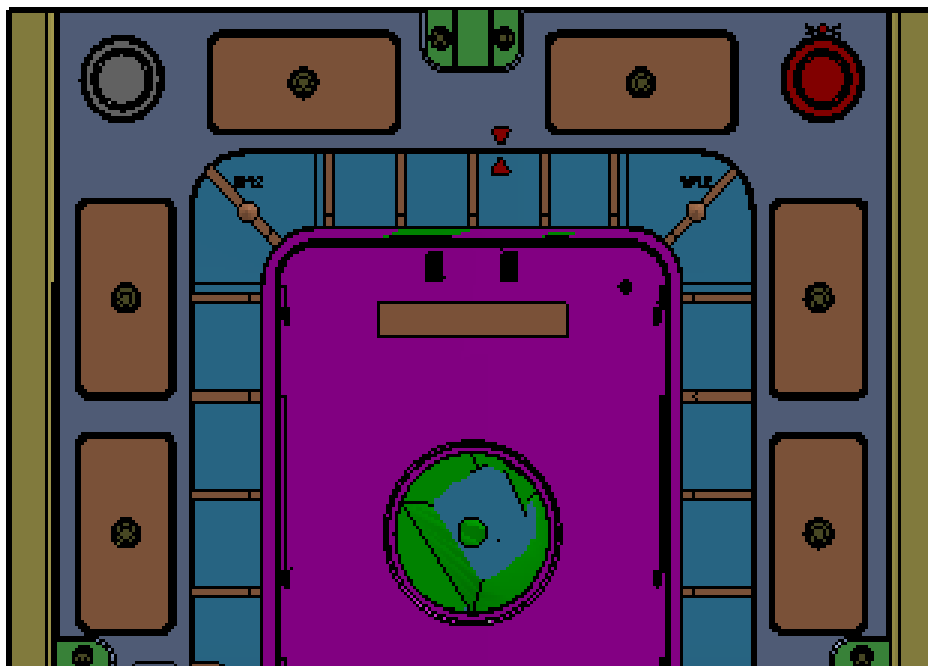


Figura 22- Estruturas retângulas que auxiliam no ajuste do molde

4.2.2 Lado extração

O lado da extração, representado na Figura 23, caracteriza-se por efetuar a extração com balancés (Figura 25). Estes foram colocados pois existem zonas negativas que causam prisão da peça no molde. Devido ao facto de a peça ser complexa geometricamente, e à necessidade de desmoldar a mesma sem qualquer marca, utilizam-se lâminas extratoras, representadas na Figura 24, (que contêm esta forma para que no momento do avanço, o produto moldado não entre em contacto com a lateral da cavidade e conseqüentemente provoque riscos e quebras na peça) e balancés, Figura 25, que auxiliam na extração da peça e evitam prisões da mesma.

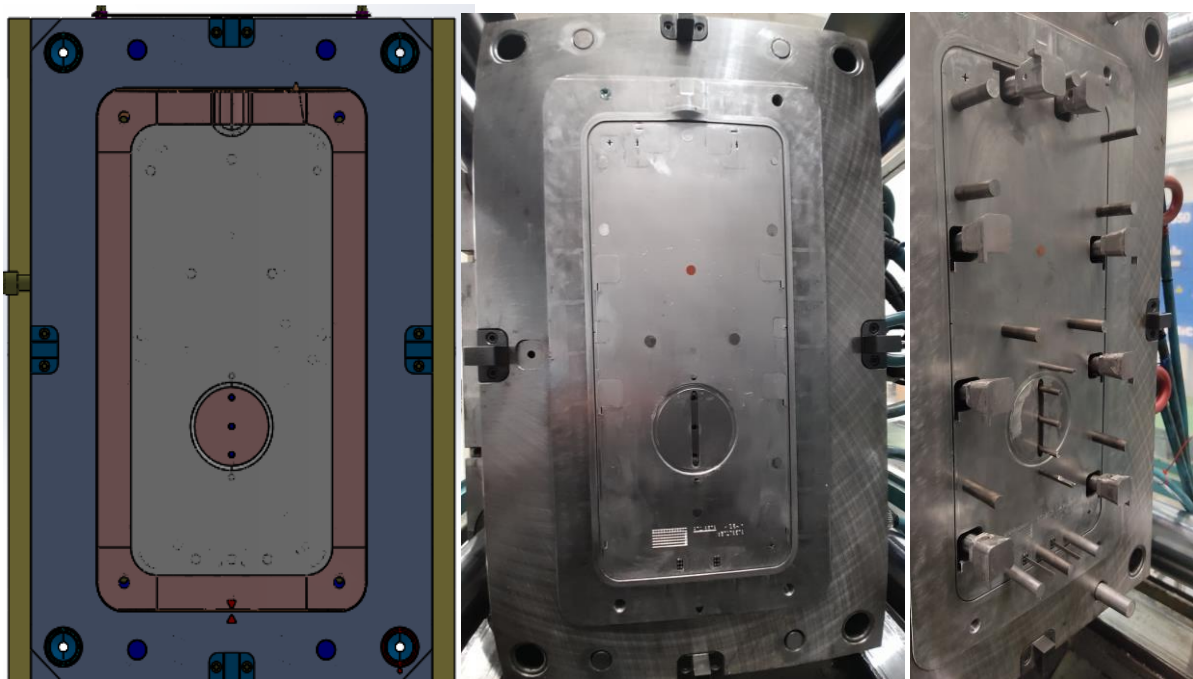


Figura 23-Representação do lado de extração em Solidworks (à esquerda) e imagem do lado de extração do molde real (à direita)



Figura 24-Lâminas Extradoras



Figura 25-Balancé

4.2.3 Canal de Arrefecimento

Como já mencionado anteriormente, a peça será visível ao consumidor, desta forma, o empeno da mesma tem de ser o mínimo possível. Posto isto, os canais de água são distribuídos de forma uniforme para assim, otimizar o arrefecimento da peça, e evitar ao máximo a ocorrência de defeitos.

Numa placa da zona de injeção (Figura 26 à esquerda), os canais de arrefecimento apresentam dois circuitos em Z (tipo de circuito recomendado para moldes de cavidade única e que apresenta uma grande área) e simétricos (recomendado pelo facto de as entradas e saídas do fluído se situarem no mesmo lado do molde e neste caso em específico, as entradas ocorrem ao "centro" da placa e as saídas nos "extremos" e as conexões são efetuadas por mangueiras como mostra a Figura 27- Sistema de entrada e saída de água do lado de injeção conectado por mangueiras, daí a necessidade de recorrer a tampões para criar desvios de percurso necessários, garantindo a vedação) [25].

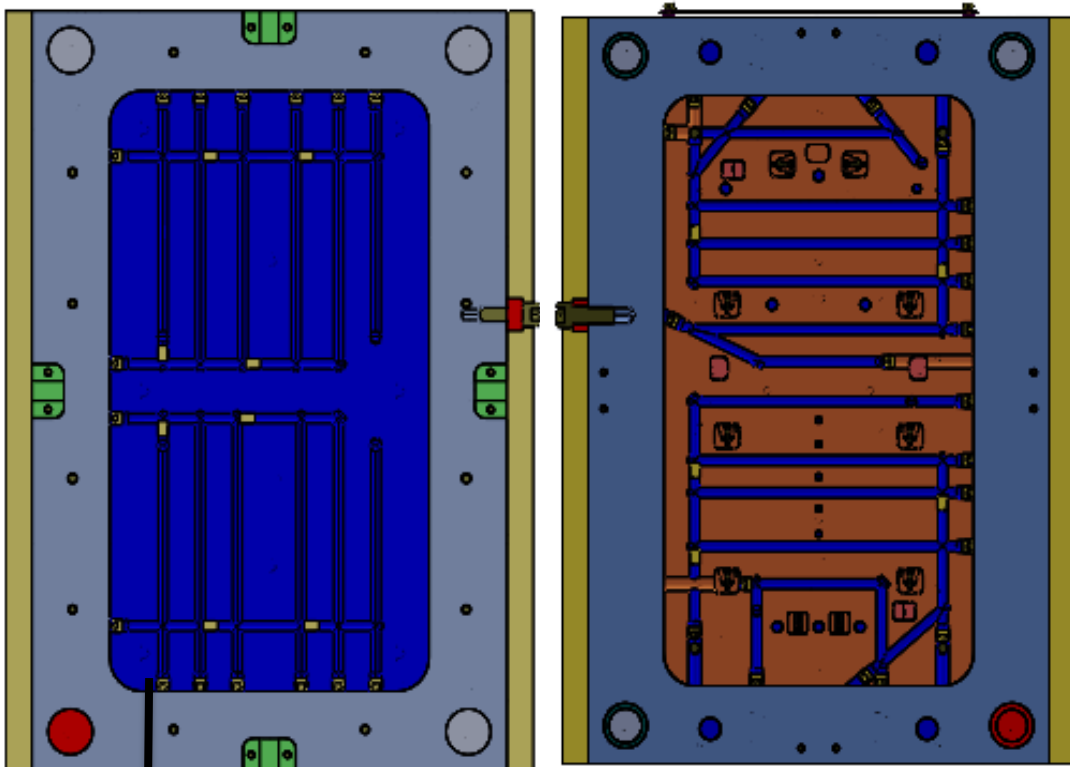


Figura 26-Sistemas de arrefecimento do lado de injeção do molde

Canais Simétricos



Figura 27- Sistema de entrada e saída de água do lado de injeção conectado por manueiras

Para além disso, este sistema de canais em Z e simétricos, é recomendado para moldes cujas placas da cavidade possuem muitos postigos, extratores, parafusos e outros condutores, que acabam por não deixar muito espaço para a construção de canais para circulação de água. Na outra placa da zona de injeção (representada na Figura 28 à direita), o sistema de arrefecimento já é um pouco mais complexo, pois apresenta circuitos em Z, em U e algumas partes com circuito alternativo.

O circuito em U é indicado na refrigeração de cavidade com perfil de produto longo e baixo e o circuito alternativo, possibilita que os canais possam estar próximos da superfície interna da cavidade, alcançando uma melhor efetividade do sistema no arrefecimento da peça [25].

No lado da extração, existe apenas um sistema de arrefecimento. Na Figura 28, é possível observar vários circuitos em U e também alternativos.

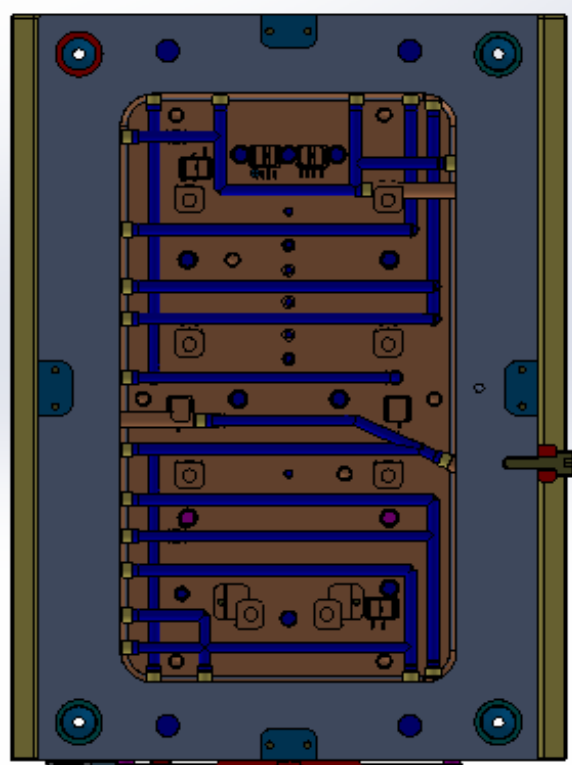


Figura 28- Sistema de arrefecimento do lado de extração

4.2.4 Injeção da peça

Visto que o molde possui canais mistos, existe a formação de um jito, Figura 29, que permite o enchimento nos dois pontos de ataque.

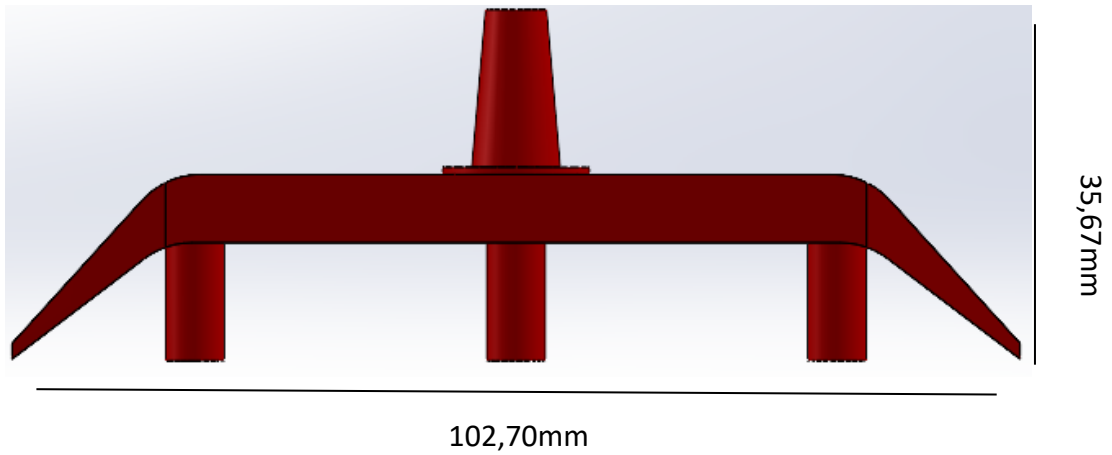


Figura 29-Jito com 2 pontos de ataque

A injeção da peça é efetuada nos dois pontos de ataque em pernos perpendiculares à peça representados na Figura 30, que são removidos antes de embalagem do produto.

Esta técnica de injeção (injeção contra extratores) permite que a peça fique isenta de marcas de injeção e que o enchimento da cavidade seja mais eficiente.

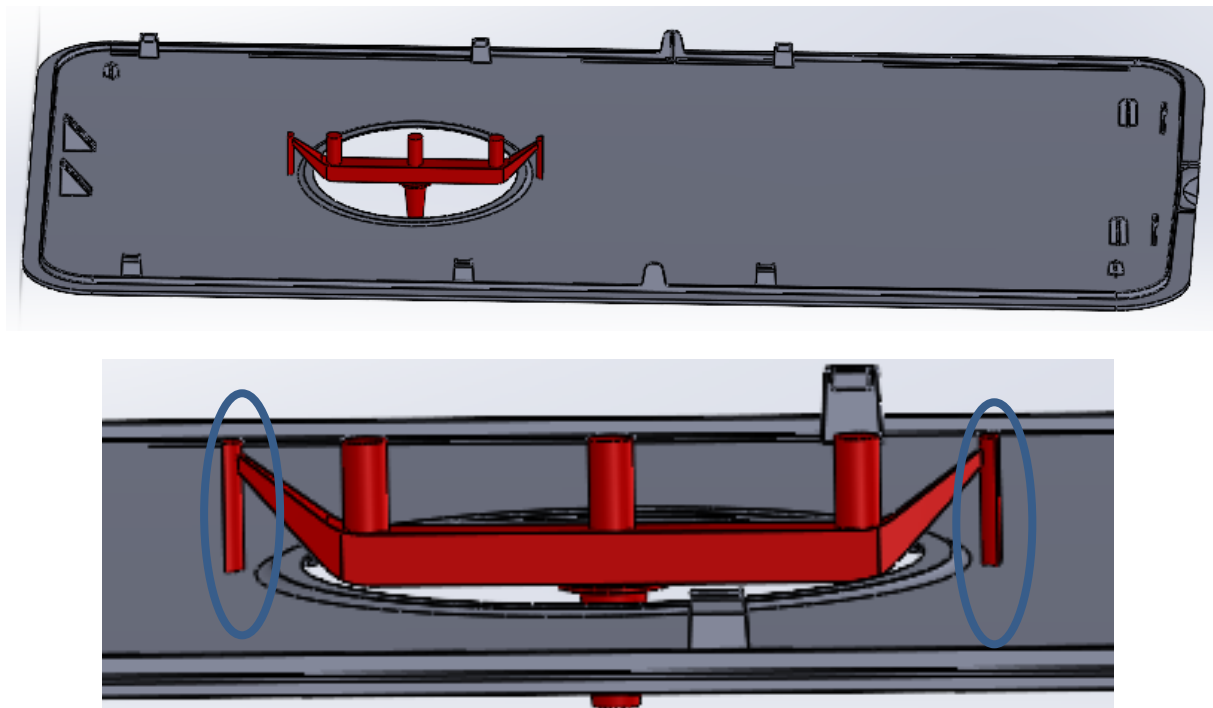


Figura 30-Representações dos pontos de ataque da peça

Os pontos de ataque inicialmente teriam ambos 1mm de diâmetro, porém, com o avanço do projeto, optou-se por aumentar ligeiramente um deles para facilitar o enchimento, ficando com cerca de 1,5mm.

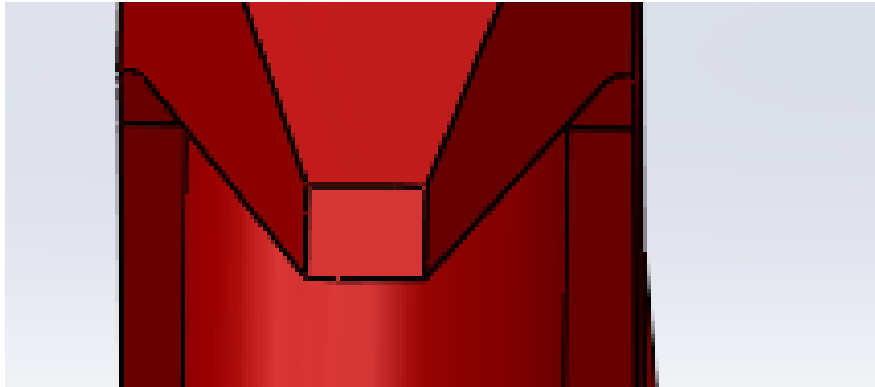


Figura 31- Ponto de Ataque

O ataque está posicionado de forma a encher a peça no lado contrário ao dos extratores, formando os pernos assinalados na Figura 30.

4.3 Máquina de Injeção

A máquina onde ocorre a injeção da peça trata-se de uma Haijinj HF3600, cujas especificações e características são apresentadas na Tabela 4.

As fotografias da máquina utilizada encontram-se no Anexo 3.

Tabela 4- Características da máquina de injeção

	Tipo de Parafuso	Parte	A	B	C
Unidade de Injeção	Diâmetro do Parafuso	mm	70	80	85
	Largura do Parafuso	L/D	24	21	19,8
	Volume de Injeção teórico	cm ³	1539	2020	2269
	Massa de injeção	g	1400	1829	2065
	Taxa de injeção	g/s	296	386	436
	Pressão de injeção	MPa	212	162	143
	Velocidade de Injeção	rpm	0-140		
	Unidade de fecho	Força de fecho	KN	3600	
Abertura máxima		mm	655		
Espaço entre guias (WxH)		mm	730x700		
Altura do molde (Min- Max)		mm	245-720		
Diâmetro de buraco de localização do molde		mm	160		
Força de ejeção		KN	111		

4.4 Estudo da Otimização do Processo

O **Scientific Injection Moulding** constitui um conjunto de etapas sequenciais que permitem determinar a maioria dos parâmetros de injeção ótimos para uma peça. Segue uma descrição da aplicação de todos os passos assim como as vantagens da aplicação dos mesmos.

1. Estudo reológico

Os materiais plásticos apresentam comportamentos viscoelásticos, o que significa, que quando sujeitos a diferentes taxas de corte, a viscosidade não se mantém constante. Se são sujeitos a taxas de corte baixas, o polímero comporta-se como um sólido, porém se as taxas de corte forem elevadas, o polímero apresenta o comportamento de um fluido. Ou seja, os plásticos apresentam um comportamento combinado.

Na fase de injeção, são aplicadas diferentes taxas de corte ao material fundido. A taxa de corte é proporcional à velocidade de injeção [6],[7].

Curva de viscosidade

Os polímeros fundidos, são fluidos não newtonianos, logo a viscosidade dos mesmos varia consoante a taxa de corte aplicada, o que implica variações de velocidade ao longo do escoamento. Os materiais poliméricos, quando sujeitos a elevadas taxas de corte, apresentam comportamentos de fluidos, ou seja, a sua viscosidade mantém-se e não varia com o tempo. Por outro lado, quando sujeitos a taxas de corte reduzidas, evidenciam o comportamento típico de um sólido, isto é, quando sujeitos a determinadas taxas de corte, assumem outra forma geométrica.

Observa-se na Figura 32, que a viscosidade é mais acentuada no momento em que o material é sujeito a taxas de corte mais baixas comparativamente ao momento em que se aplicam taxas de corte mais elevadas. Com o aumento da taxa de corte, as moléculas dos polímeros tendem a alinhar-se umas em relação às outras, originando estruturas mais orientadas (como é observado na Figura 32) reduzindo a resistência ao fluxo.

O gráfico da curva de viscosidade, permite aferir o efeito da velocidade de injeção na resistência ao fundido, ou seja, mostrar a região onde a viscosidade é mais consistente permitindo a redução da variação entre moldações [6],[26].

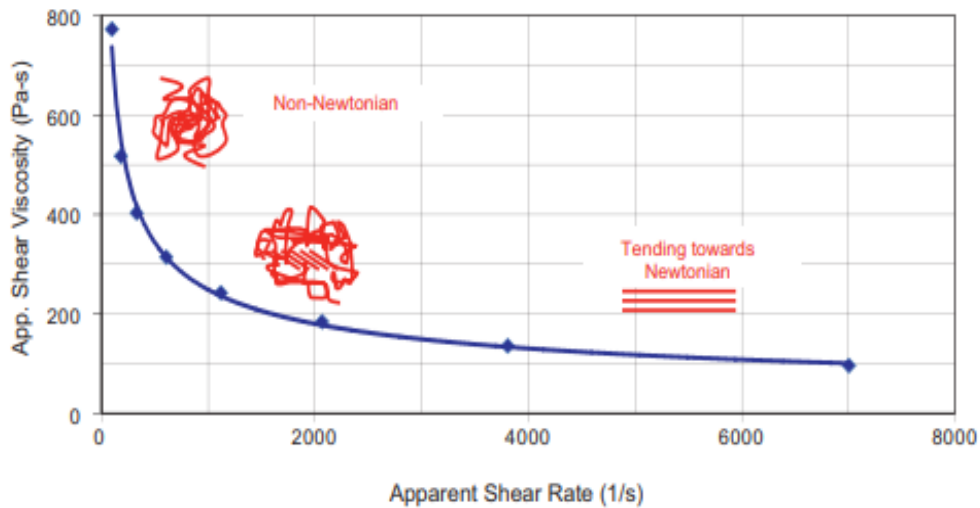


Figura 32-Efeito da taxa de corte na viscosidade representado numa escala linear; Adaptado de [6]

Procedimento Para Obter a Curva de Viscosidade

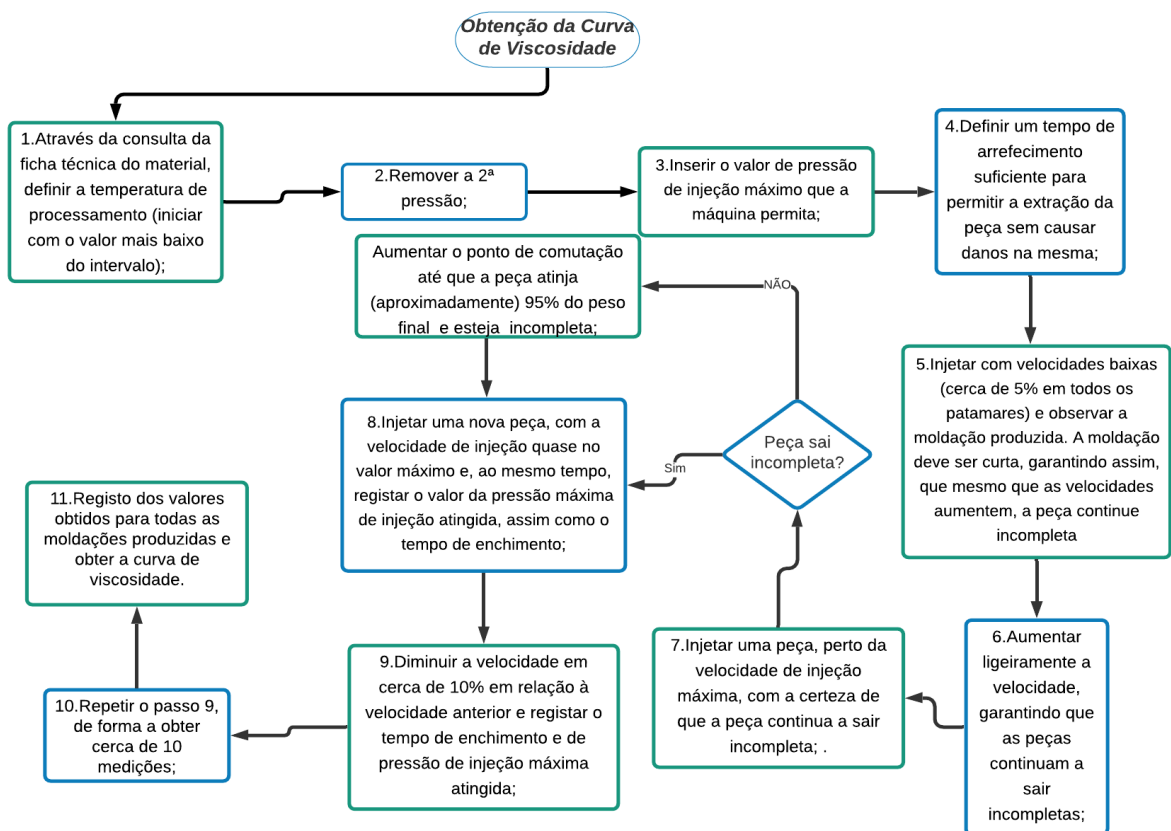


Figura 33- Procedimento para obtenção da Curva de Viscosidade

2. Estudo do balanceamento entre cavidades

Grande parte dos moldes são multi-cavidade, logo existem grandes probabilidades de o enchimento não ser uniforme em todas as cavidades. Este facto afeta diretamente a consistência entre cavidades, uma vez que devido ao enchimento não ser uniforme, os pesos e as dimensões das peças serão diferentes entre si. É necessário garantir um correto balanceamento do molde para otimizar um processo de moldação por injeção.

O estudo do balanceamento das cavidades, permite verificar o balanço de enchimento entre todas as cavidades e permite alcançar uma melhor consistência de cavidade para cavidade[6],[26].

Procedimento para Estudo do Balanceamento de Cavidades

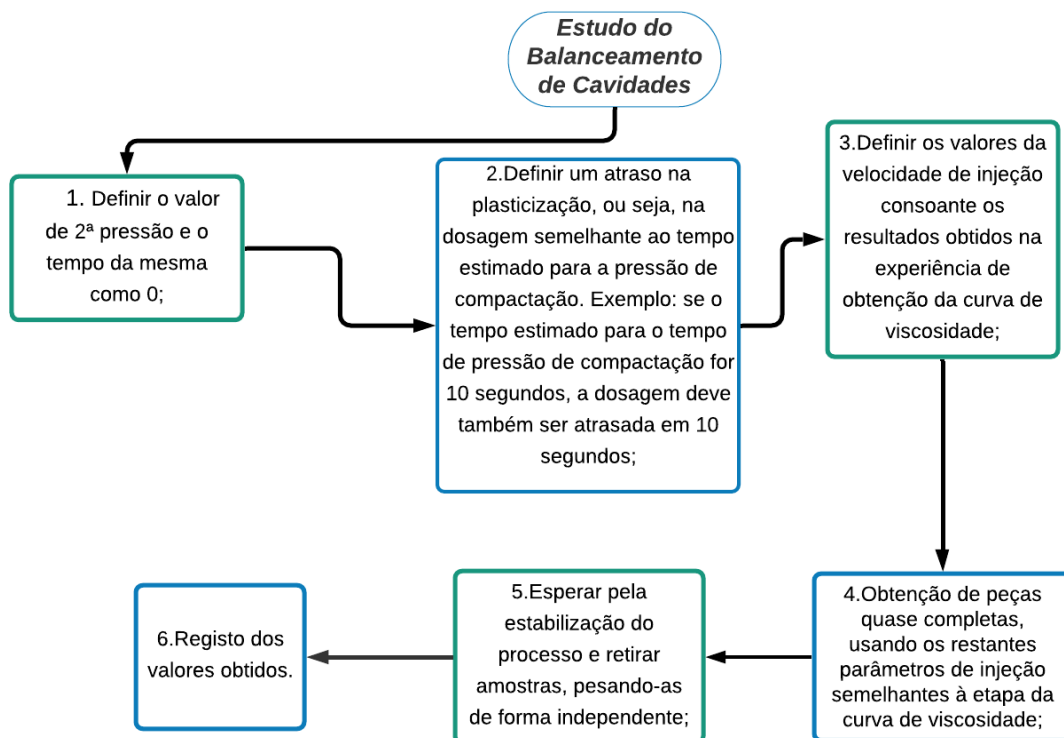


Figura 34- Procedimento para obter Balanceamento entre Cavidades

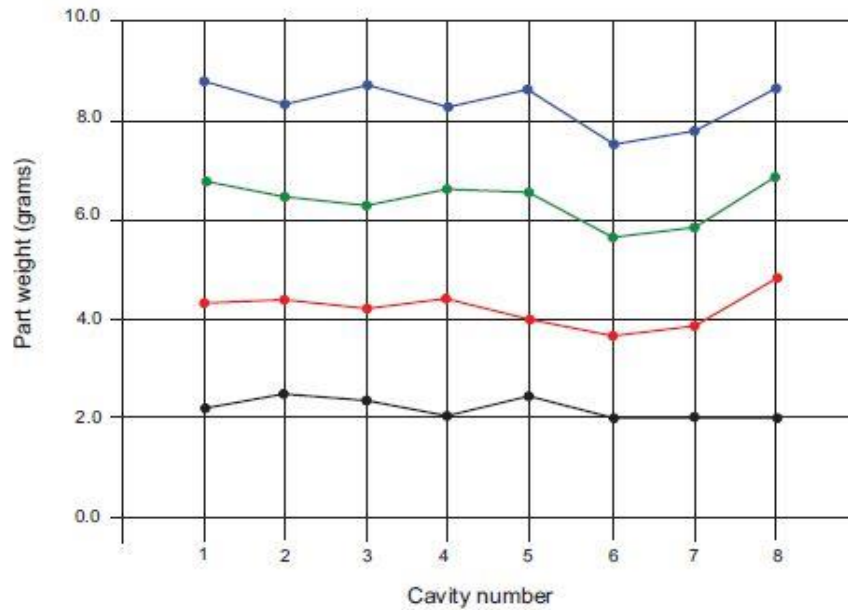


Figura 35- Exemplo de Gráfico de Balanceamento de Cavidades

3. Estudo da queda de pressão

O polímero fundido, flui através de várias secções desde o bico até ao molde, e ao mesmo tempo a frente do fundido sofre uma queda de pressão devido a efeitos de fricção e arrastamento. Para além disso, quando o plástico atinge as paredes do molde, inicia-se o arrefecimento do material. Posto isto, para ser possível a fluência do material com um caudal constante será necessária uma pressão adicional.

Dependendo da capacidade da bomba da máquina de injeção, existe um valor de pressão máxima admitida para fazer avançar o fuso à velocidade de injeção requerida. Naturalmente, a pressão máxima necessária para o efeito, tendo em conta um determinado processo, nunca poderá poder exceder a atual capacidade da máquina. Se a pressão requerida para fazer avançar o fuso for superior à capacidade da máquina, este nunca será capaz de manter a velocidade de injeção definida. A pressão necessária para “empurrar” o plástico a uma velocidade constante aumenta à medida que o fluxo avança, porém, a pressão real da frente do fundido diminui com o avanço do fluxo.

Sabendo a queda de pressão em cada secção pela qual o fluxo passa, permite determinar a queda de pressão geral assim como, as secções onde as quedas de pressão são mais altas. Caso exista elevada queda de pressão, o sistema de canais do molde pode ser modificado a fim de reduzir a mesma e, por conseguinte, obter um fluxo mais consistente.

O estudo da queda de pressão permite perceber se a pressão é limitada e ajuda na consistência do processo[6],[26].

Procedimento para estudo da Queda de Pressão

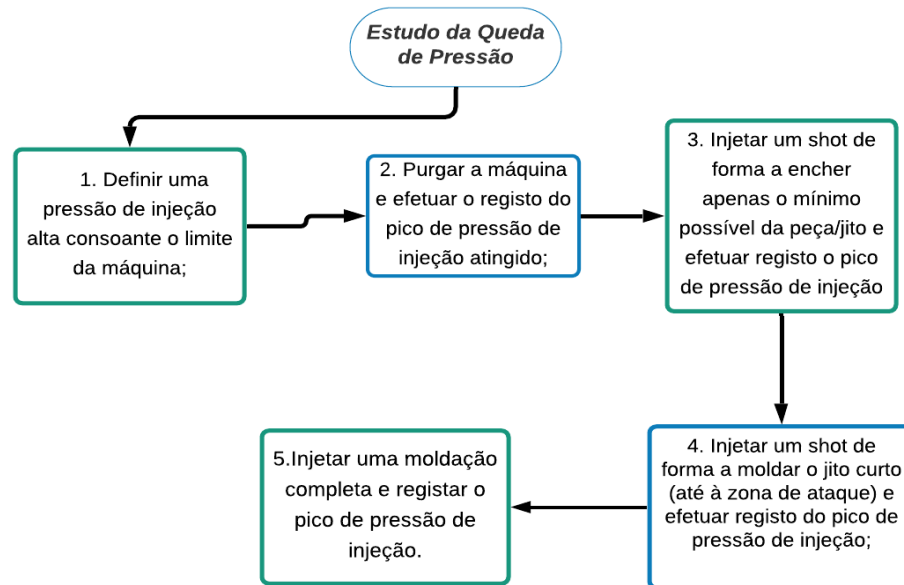


Figura 36- Procedimento para obtenção da Queda de Pressão

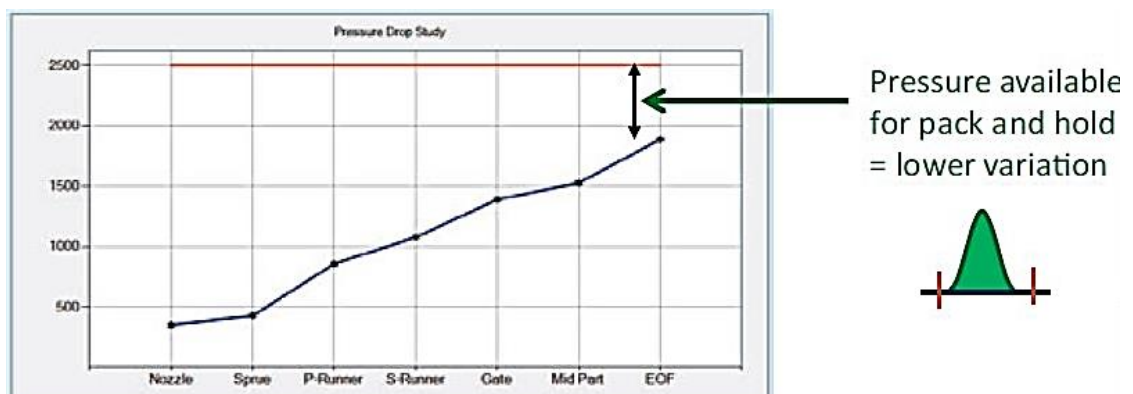


Figura 37- Gráfico Exemplo da Queda de Pressão

Notas importantes:

- O fluxo de material é considerado em toda a máquina de injeção assim como no molde. O circuito do material atravessa o bico da máquina, bico do canal, jito, ataque e peça completa.
- A pressão máxima utilizada não deve ser superior a 70% da pressão máxima de injeção permitida pela máquina;
- É necessário cuidado no aumento da pressão para não danificar o molde;

- Definir um atraso significativo na dosagem para impedir a entrada de mais material durante esta fase;
- Retirar sempre pelo menos 3 moldações iguais e introduzir numa Tabela auxiliar e usar os valores médios para os cálculos principais;

4. Estudo da janela de processo

A determinação da janela de processo é o estudo mais importante para o desenvolvimento de um processo robusto. Quanto mais ampla a janela de processo for, maior a probabilidade de obter um processo robusto.

Na fase de compactação, existe a entrada de mais material plástico para o interior da cavidade, de forma a compensar possíveis perdas na peça devido a efeitos de contração. Nesta etapa, existem várias variáveis que devem ser controladas como a 2ª pressão, tempo de compactação, contra-pressão.

A janela de processo é também conhecida como diagrama da área de moldação. Esta é a área na qual as peças aceitáveis são moldadas.

Este estudo permite evidenciar a capacidade do molde de produzir peças esteticamente aceitáveis e elevada consistência [6],[26].

Procedimento para Estudo da Janela de Processo

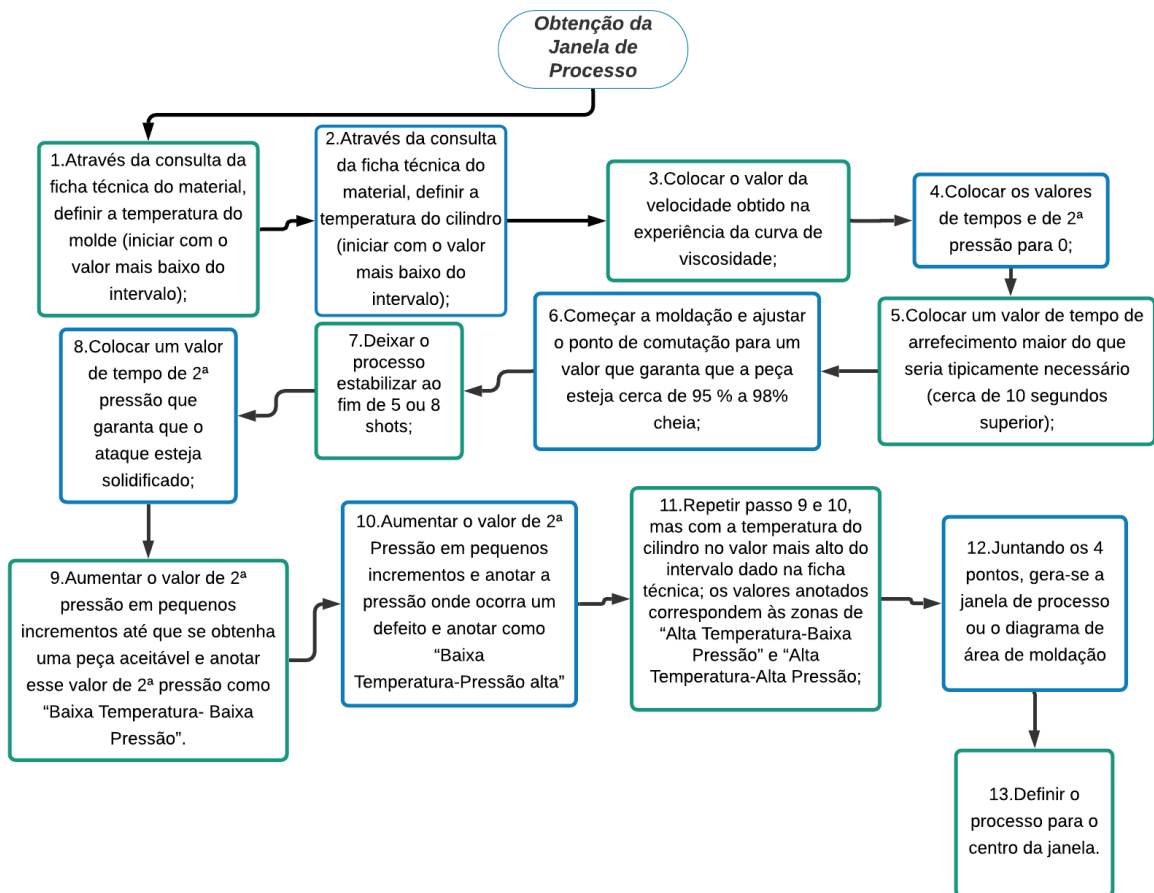


Figura 39- Procedimento para obter a Janela de Processo

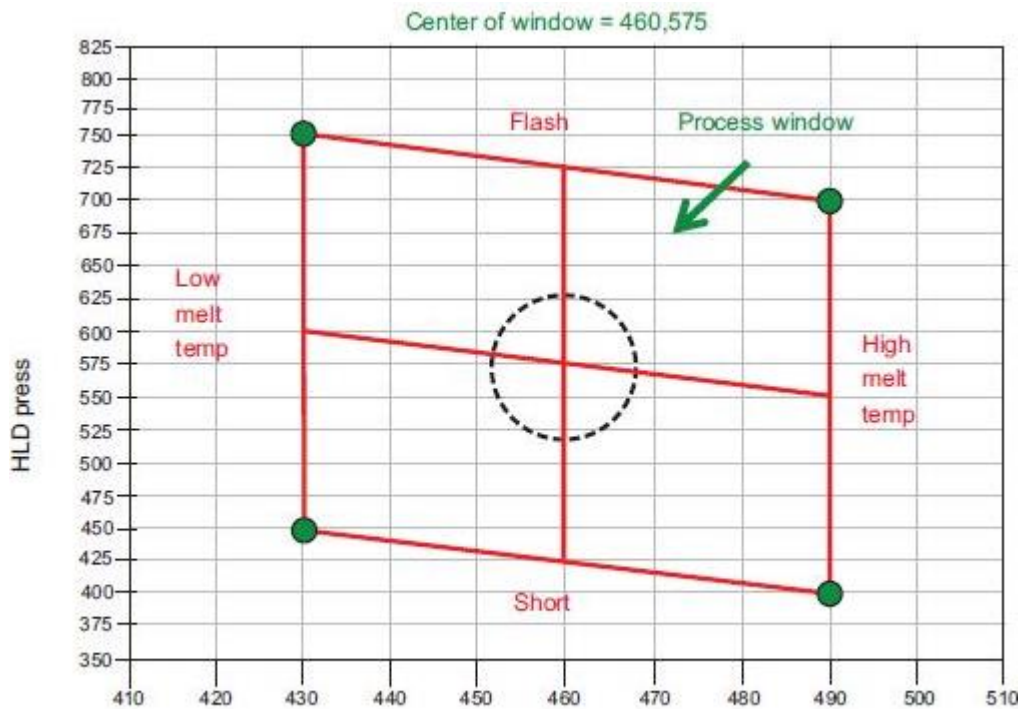


Figura 38- Gráfico Exemplo do Processo de Injeção

Notas importantes

- Ter cuidado no aumento da pressão para não danificar o molde;
- Pressões excessivas podem levar à sobre compactação do material na cavidade;

5. Determinação do Tempo de Solidificação do Ataque

A entrada do plástico fundido no molde dá-se pelo ataque. Esta fase de enchimento é dinâmica pois a temperatura do fundido, a pressão e velocidade do mesmo alteram-se com o tempo. Depois da entrada dá-se o preenchimento da cavidade. Quando esta se encontra quase cheia a fase de empacotamento e a de espera iniciam. À medida que a velocidade de fluxo do fundido diminui, a temperatura também desce e isto causa um aumento da viscosidade do fundido. Quando a viscosidade no ataque diminui para um valor que não permita ao fundido fluir mais, o ataque é considerado congelado. O tempo necessário para se atingir este estado denomina-se tempo de solidificação do ataque.

Este estudo ajuda na melhoria da consistência de injeção para injeção [6],[26].

Procedimento para Estudo do Tempo de Solidificação do Ataque

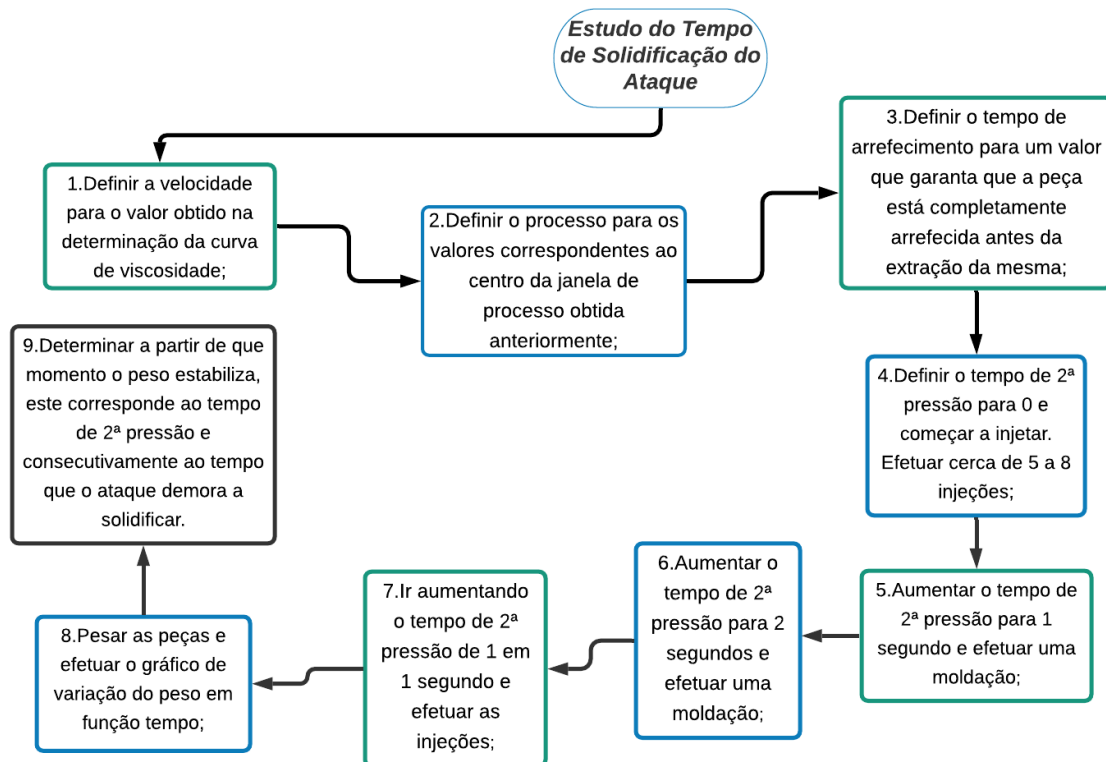


Figura 40- Procedimento para Obtenção do Gráfico de Solidificação do Ataque

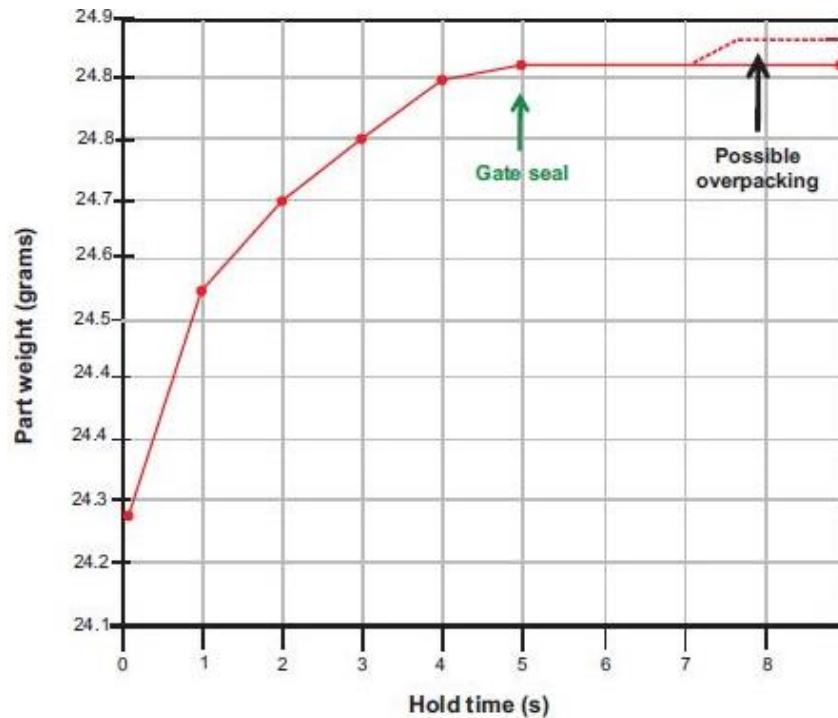


Figura 41-Gráfico Exemplo da Solidificação de Ataque

Notas importantes

- Não realizar um estudo de solidificação do ataque num molde de canais quentes.

6. Estudo do tempo de arrefecimento

O material começa a arrefecer no momento que atinge as paredes do molde. Após o empacotamento e o tempo de 2ª pressão, o tempo de arrefecimento inicia. Até ao final do arrefecimento, o molde permanece fechado. Quando o tempo de arrefecimento cessa e a peça atinge a temperatura correta para a extração, o molde abre e a peça é extraída. Se ocorrer a extração da peça antes do tempo de arrefecimento terminar, a peça está quente de mais e pode causar deformação da mesma. Por outro lado, caso o tempo de arrefecimento seja excessivo, ocorre perda de tempo, pois é tempo que se está a utilizar desnecessariamente.

O tempo de arrefecimento é crucial para manter as dimensões das peças consistentes e assim melhorar o ciclo de eficiência do processo.

O procedimento para determinar o tempo de arrefecimento ideal, consiste em injetar peças a diferentes tempos de arrefecimento e observar se existem defeitos visuais [6],[26].

Procedimento para Estudo do Tempo de Arrefecimento

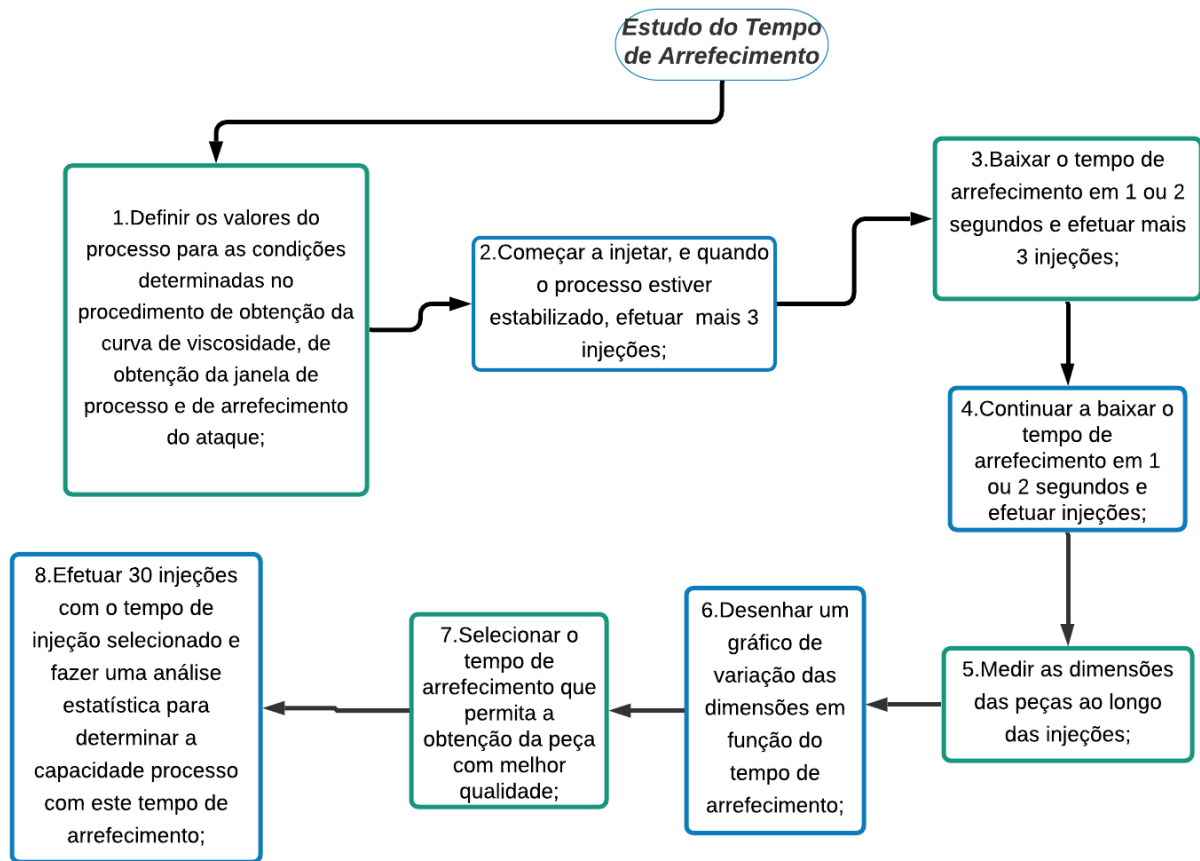


Figura 42- Procedimento para obtenção do gráfico de variação do tempo de Arrefecimento

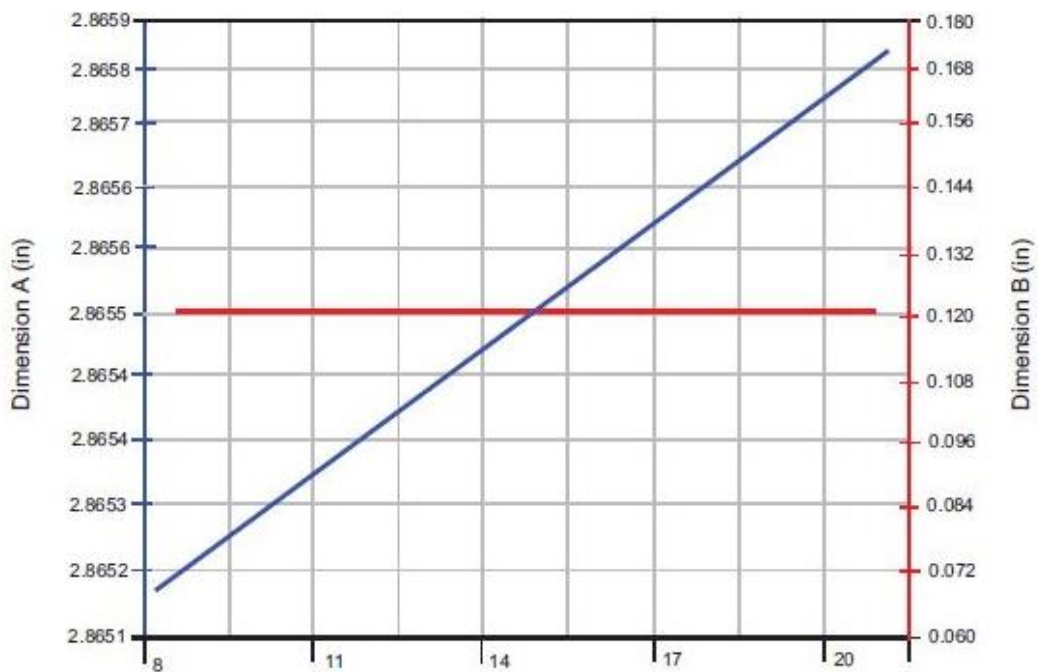


Figura 43- Gráfico Exemplo de determinação de Tempo de Arrefecimento

4.5 Definição de variáveis e Planejamento de Experiências para o Projeto

4.5.1 Diagramas de Ishikawa

Antes de se selecionarem as variáveis em estudo, devem-se determinar quais as características da peça que são mais importantes. Após essa análise determinam-se quais as principais variáveis que influenciam as características definidas.

Para cada uma das características foi construído um diagrama de Ishikawa, para perceber quais as ações e variáveis ao longo do processo que poderiam pôr em causa a qualidade ou funcionamento do produto final. Em todos os diagramas se analisaram parâmetros relacionados com matéria-prima, máquina, processo, mão-de-obra, molde e método.

- Brilho

Visto que esta peça estará numa parte visível ao consumidor, é necessário que que esta tenha um acabamento isento de chupados (ou quaisquer outros defeitos visíveis), não apresentando variação de cores e que mantenha o acabamento com alto brilho, pois este torna-a mais harmoniosa e, por conseguinte, mais apelativa esteticamente.

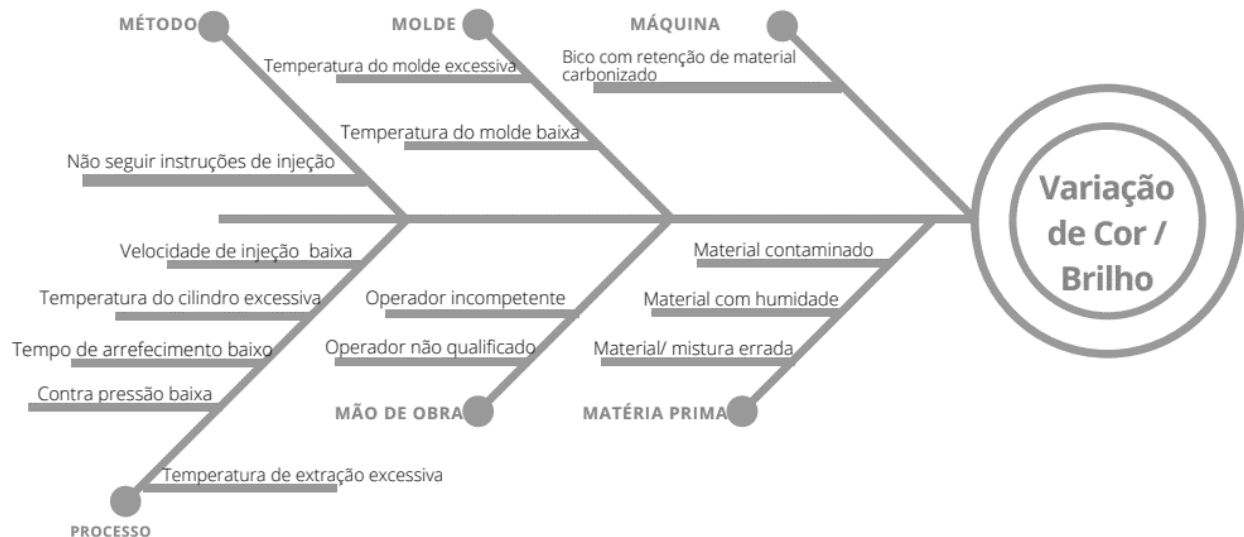


Figura 44- Diagrama de Ishikawa do brilho

- Chupados

Como dito anteriormente, a peça estará disposta numa zona bastante visível, logo para além da superfície apresenta alto brilho, esta tem de estar isenta de defeitos como chupados. Estes, perturbam a estética do produto, condicionando a venda do mesmo.

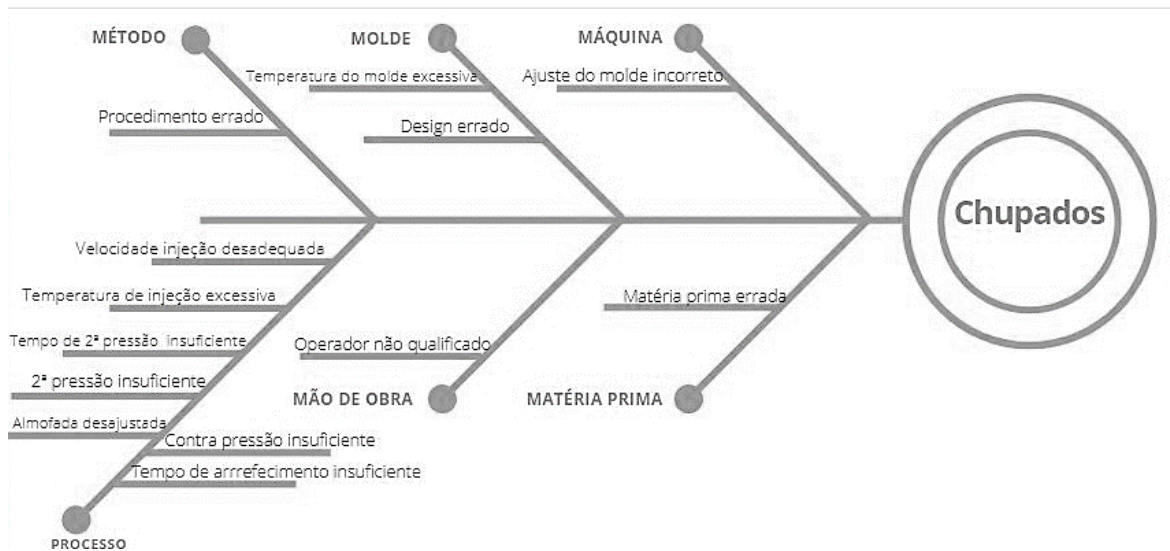


Figura 45- Diagrama de Ishikawa de Fragilidade

Desta forma, todos os fatores que contribuem para o surgimento de chupados têm de se evitados, tanto no processo de injeção, como nas outras etapas.

- Fragilidade

Como mencionado, o produto em estudo contém engates, e uma vez que a peça é posteriormente encaixada noutra peça, estes têm de ser seguros e não conter fragilidade, pois caso empenem ou contraíam, o encaixe pode não ser possível. Desta forma, todos os fatores que contribuem para o surgimento de fragilidade na peça, têm de se evitados, tanto no processo de injeção, como nas restantes etapas.

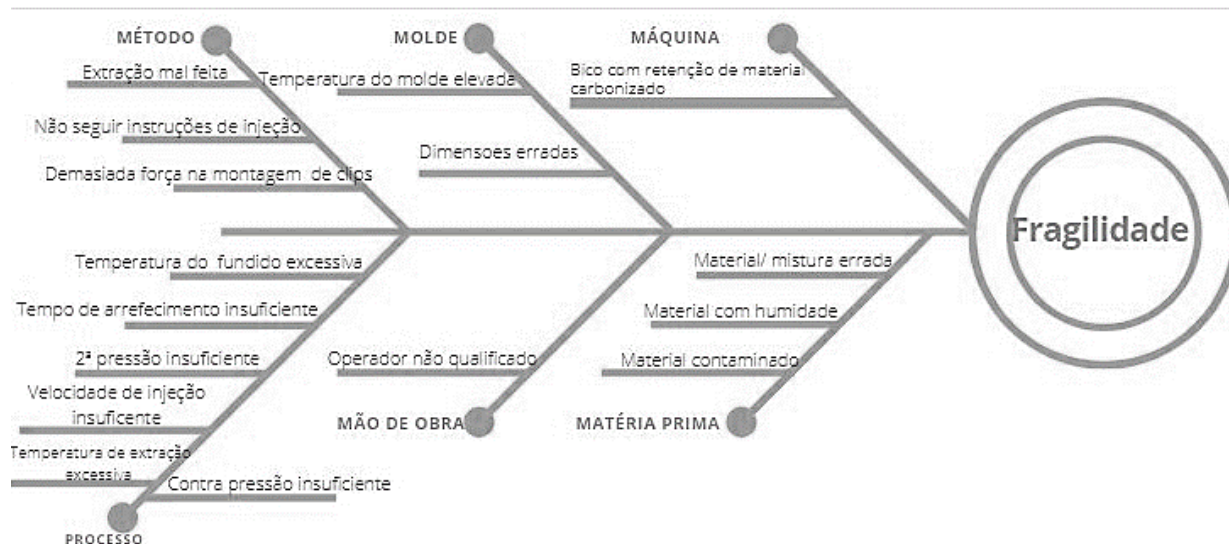


Figura 46- Diagrama de Ishikawa de Fragilidade

Analisando todos os diagramas, constata-se que algumas das variáveis em comum tratam-se da temperatura do fundido, da velocidade de injeção, do tempo de arrefecimento e 2ª pressão.

Tendo em conta também as características que são analisadas nos testes de melhoria de processo descritos anteriormente, as variáveis a estudar são as seguintes:

1. Temperatura do molde;
2. Temperatura do fundido;
3. Temperatura de extração;
4. Velocidade de injeção;
5. 2ª Pressão;

4.5.2 Planeamento de experiências do Projeto

Após a seleção das variáveis a estudar estar finalizada é necessário planejar as experiências. Para isso, utiliza-se o método de Taguchi descrito anteriormente.

Na Tabela 5 verificam-se os valores correspondentes aos 2 níveis, assim como as respetivas unidades de cada uma das 5 variáveis em estudo.

Todos os valores respetivos às temperaturas foram selecionados a partir do intervalo de valores fornecido na ficha técnica do material.

Os restantes valores foram escolhidos consoante as características da máquina de injeção e valores utilizados em ensaios prévios da peça.

Tabela 5 - Variáveis e respetivos níveis

Variáveis	Nível 1	Nível 2	Unidades
Temperatura do molde	40	70	°C
Temperatura do fundido	220	240	°C
Temperatura de extração	65	85	°C
Velocidade de Injeção	20	99	%
Velocidade de Injeção	25	90	Bar

Na Tabela 6 é possível verificar o plano de experiências, que neste caso se trata de uma tabela L_{16} . O nível 1 corresponde ao menor valor de cada variável e o nível 2 e ao maior.

Tabela 6 - Plano de Experiências

Experiência	Temperatura do molde	Temperatura do fundido	Temperatura de extração	Velocidade de Injeção	2ª Pressão
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2
3	1	1	2	1	2
4	1	1	2	2	1
5	1	2	1	1	2
6	1	2	1	2	1
7	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2
9	2	1	1	1	2
10	2	1	1	2	1
11	2	1	2	1	1
12	2	1	2	2	2
13	2	2	1	1	1
14	2	2	1	2	2
15	2	2	2	1	2
16	2	2	2	2	1

No plano de experiências (Tabela 6) é possível verificar que são efetuadas 16 experiências que envolvem o experimento de todos os níveis de todas as variáveis.

Neste caso, as 16 experiências são realizadas tanto em forma de simulações no programa Moldex 3D, como na forma de experiências práticas para, posteriormente, se comparar os respectivos resultados.

4.6 Ferramentas Utilizadas em Testes Experimentais

Para a realização dos testes experimentais e análise das peças resultantes dos mesmos foram necessárias diversas ferramentas.

Nos ensaios em que foi necessário controlar o peso das peças, recorreu-se a uma balança digital (Figura 47).



Figura 47- Balança Digital

Relativamente à análise de comprimento, largura, empeno e profundidade de chupados, utilizou-se um equipamento de metrologia. Para a medição dos empenos das peças extraídas dos ensaios práticos, foram-se colocando as mesmas na peça adjacente (peça onde futuramente fará encaixe para estruturar o produto final) para verificar se os respetivos engates encaixavam, e depois no equipamento de medição, mediram-se as diferenças de altura entre os vários pontos seleccionados, como se pode observar na Figura 48.

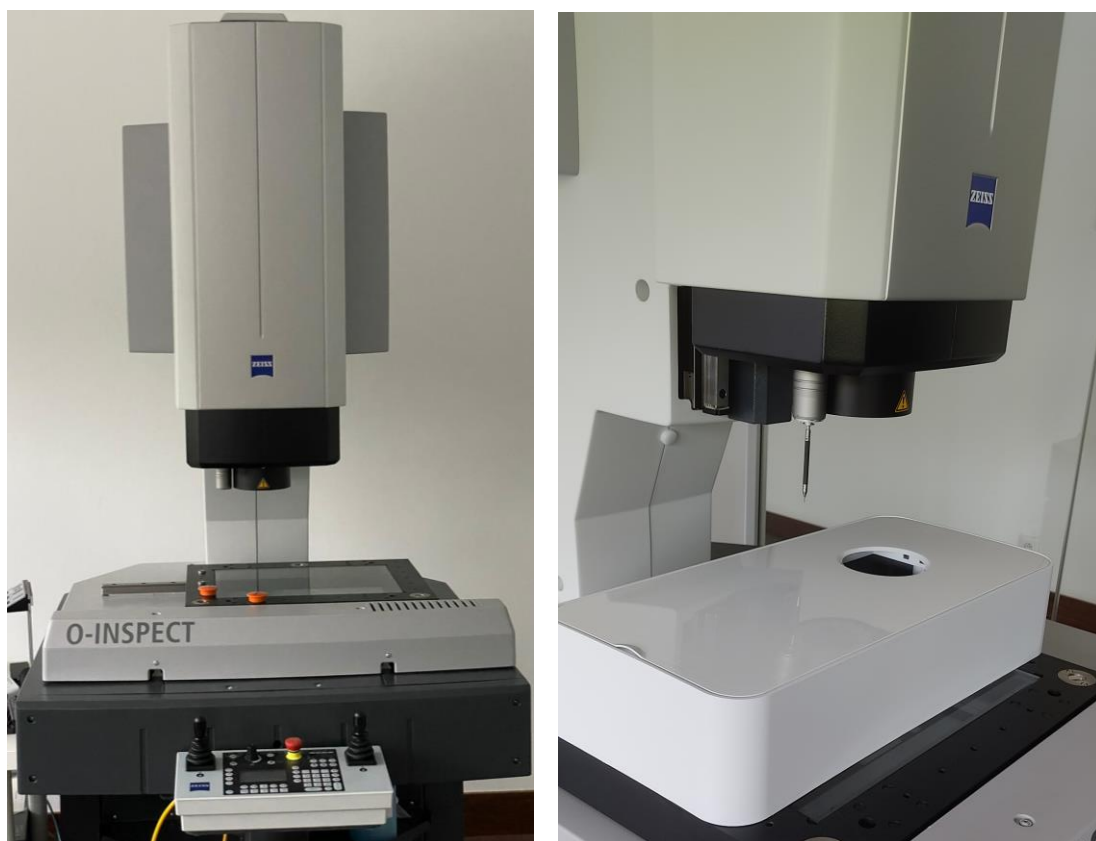


Figura 48- Equipamento de metrologia

5. RESULTADOS

Neste capítulo abordam-se os resultados obtidos dos testes dos 6 passos, das simulações em Moldex e dos testes experimentais.

Nas simulações e nos testes experimentais avaliou-se a variação de tempo de ciclo, de peso, de empenos e chupados.

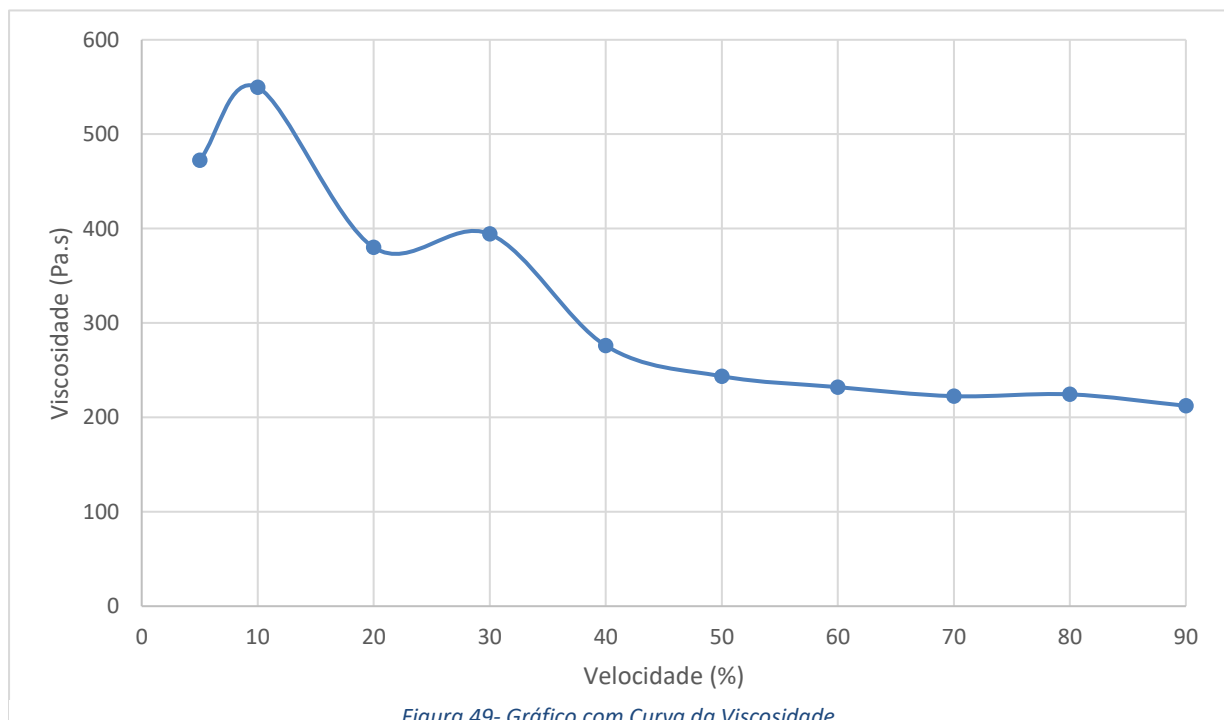
5.1 Resultados 6 Passos

5.1.1 Curva de Viscosidade

Analisando o gráfico da Figura 49, é perceptível que inicialmente, a viscosidade diminui com o aumento da velocidade de injeção, porém, a partir de velocidades de sensivelmente 60 %, a curva permanece razoavelmente constante, o que indica que este material pode ser processado a velocidades superiores sem a ocorrência de elevados defeitos. Estes valores correspondem

a viscosidades entre 200 e 250 (Pa.s). Desta forma, definindo a velocidade de injeção para 50 %, 60% ou 70% garante-se que o processo de enchimento permanece consistente. Pequenas variações naturais que possam ocorrer, não causarão grandes mudanças na viscosidade que, por sua vez originariam variações de moldação para moldação, como aconteceria a velocidades de injeção mais baixas. A velocidade de injeção deve ser então selecionada perto da zona de curvatura, pois é aqui que a viscosidade é maior e onde se observa maior consistência entre moldações.

Significa também que o material pode ser processado a elevadas taxas de corte sem implicar o aparecimento de defeitos muito significativos, porém, injeções a velocidades excessivamente altas (por exemplo 90%) não são aconselháveis, uma vez que, o material plástico pode ser sensível às taxas de corte correspondentes a esse valor de velocidade, e consequente levar à degradação do mesmo a elevadas pressões de injeção.



Otimizar a velocidade de injeção através da reologia, é o primeiro passo para obter um processo robusto.

5.1.2 Queda de Pressão

Nesta experiência, o ponto de comutação é alterado de forma a injetar apenas a zona em que se pretende avaliar a pressão.

Na Tabela 7, observam-se os diferentes valores de dosagem e de ponto de comutação inseridos conforme a zona que se pretendia moldar.

Tabela 7- Valores de dosagem e ponto de comutação das zonas moldadas

Zona	Dosagem (mm)	Ponto de Comutação (mm)
Purga	85	-
Injeção mínima	85	60
Jito/ataque	85	40
Peça completa	85	12
Máximo	85	12

Com base nos resultados obtidos representados na Figura 50, observa-se que o maior valor de queda de pressão é de 110 bar, e este não ultrapassa os 70 % da pressão de injeção máxima admissível pela máquina (160 bar).

A fase de empacotamento e de 2ª pressão constituem uma fase conjunta de compensação. É necessário existir pressão suficiente para pressurizar o material no interior da cavidade e evitar peças incompletas. Caso o processo seja limitado por pressão, existem fortes possibilidades de as peças ficarem chupadas ou subdimensionadas com grandes variações ao longo das mesmas.

Neste caso, existe ainda uma margem de pressão de injeção disponível que se pode utilizar caso as peças comecem a sair com defeitos de enchimento.

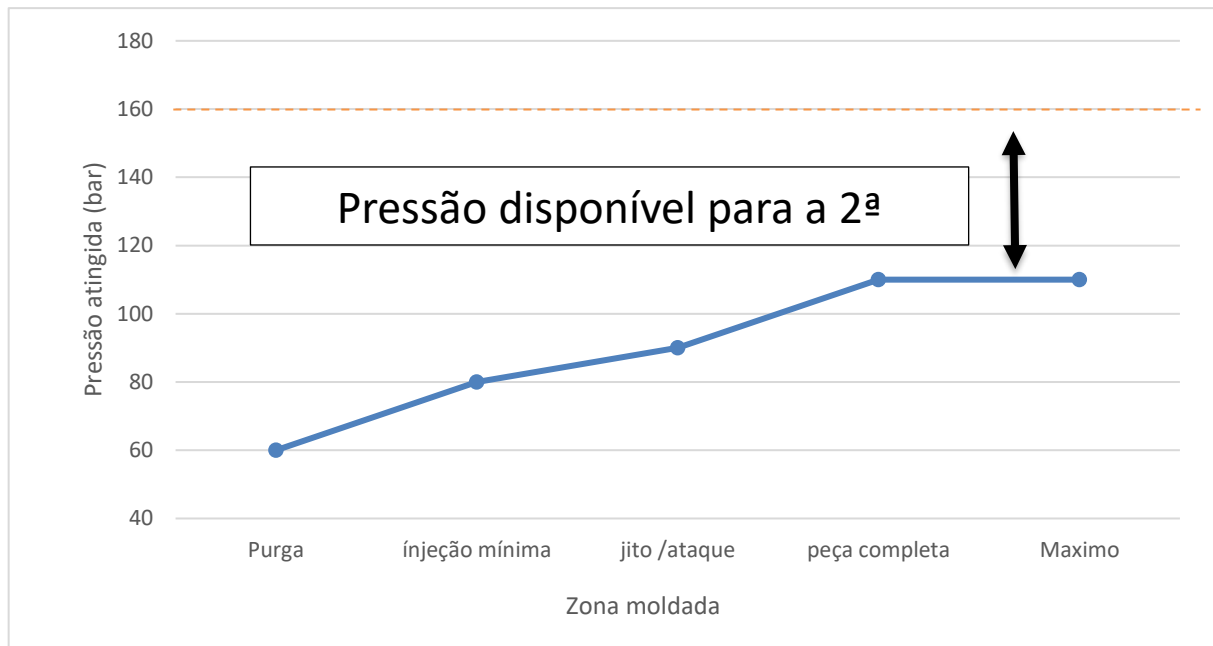


Figura 50- Gráfico de Queda de Pressão

5.1.3 Janela de Processo

Na Figura 51 está representada a janela de processo obtida.

A dimensão da janela do processo é um indicador da variação que o processo tolera enquanto ainda consegue produzir peças esteticamente aceitáveis. O objetivo é obter uma janela ampla, uma vez que, se esta for muito estreita, pequenas variações podem ser suficientes para se obterem peças com defeitos, logo, o risco de ocorrência de falhas é muito alto. Um processo robusto contém uma janela de processo ampla que acomoda a variação inerente no sistema. Analisando Figura 51, conclui-se que o centro da janela de processo encontra-se próxima da 2ª Pressão de 72 a 77, e na temperatura de fundido de 230 °C. Porém a janela é bastante abrangente, logo o processo consegue suportar variações significativas sem que surjam defeitos.

A janela de processo da peça em específico é característica de um processo robusto, pois suporta elevadas variações.

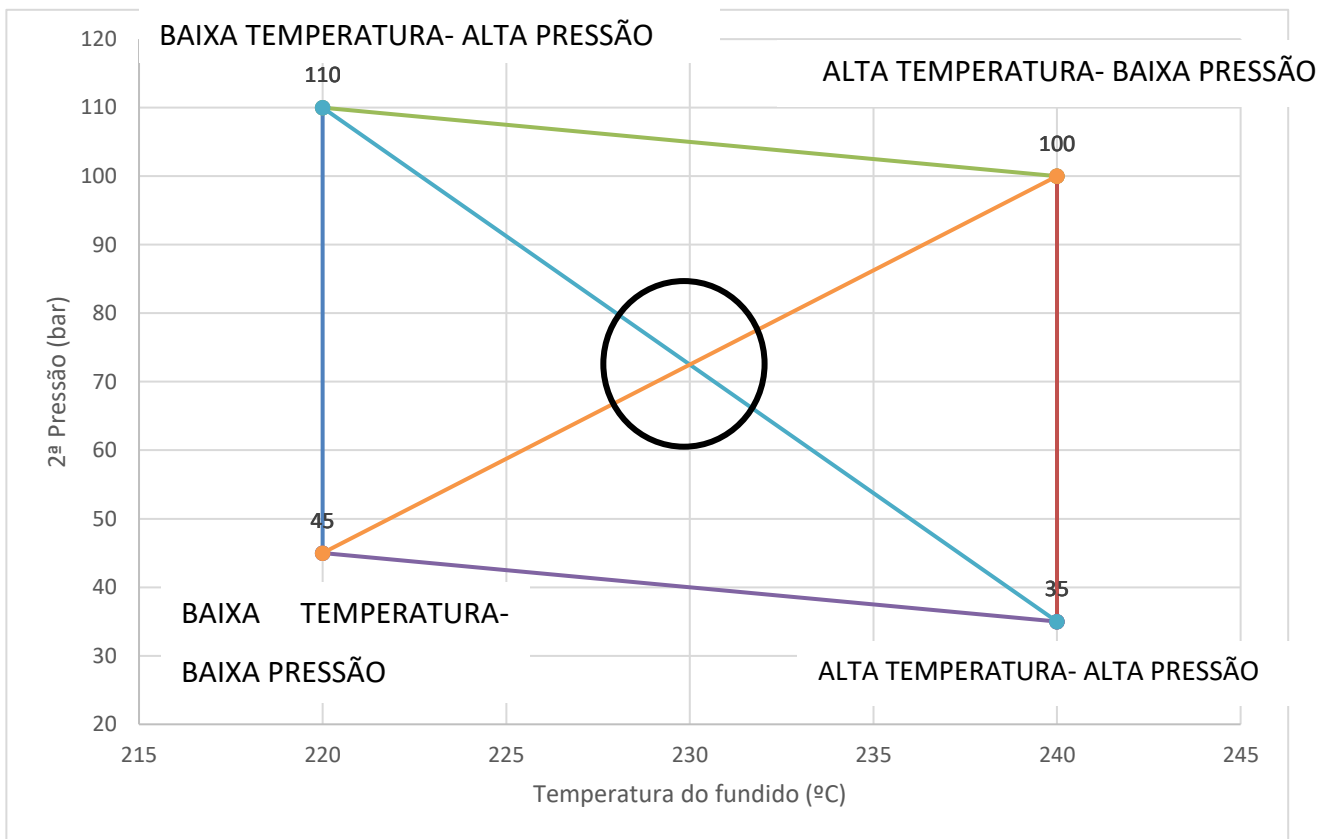


Figura 51- Janela de Processo

5.1.4 Solidificação do ataque

A experiência foi efetuada com um valor de 2ª Pressão de 77 bar. Analisando o gráfico da Figura 52 acima, é notório que a solidificação do ataque ocorre aproximadamente aos 2 segundos de tempo de 2ª pressão. O tempo de 2ª pressão a escolher deve ser 1 segundo superior ao tempo de solidificação do ataque, pois desta forma, é assegurado que em todos os ciclos o ataque está completamente solidificado no fim da fase de atuação de 2ª pressão. Neste caso em específico, o valor de tempo de 2ª pressão deve então rondar os 3 segundos, de forma a assegurar que o ataque estará sempre completamente solidificado.

O tempo de arrefecimento escolhido inicia após a aplicação da 2ª pressão, todavia, o material começa a arrefecer logo no momento em que este entra em contacto com as paredes do molde. Deste modo, o verdadeiro tempo de arrefecimento é a soma do tempo de enchimento com compactação e 2ª pressão e finalmente com o tempo de arrefecimento que se seleciona.

Este tempo de arrefecimento total, é o que define a qualidade da peça moldada. Caso o tempo de 2ª pressão seja reduzido em 0,5 segundos, este tempo deve ser compensado no tempo de arrefecimento e vice-versa.

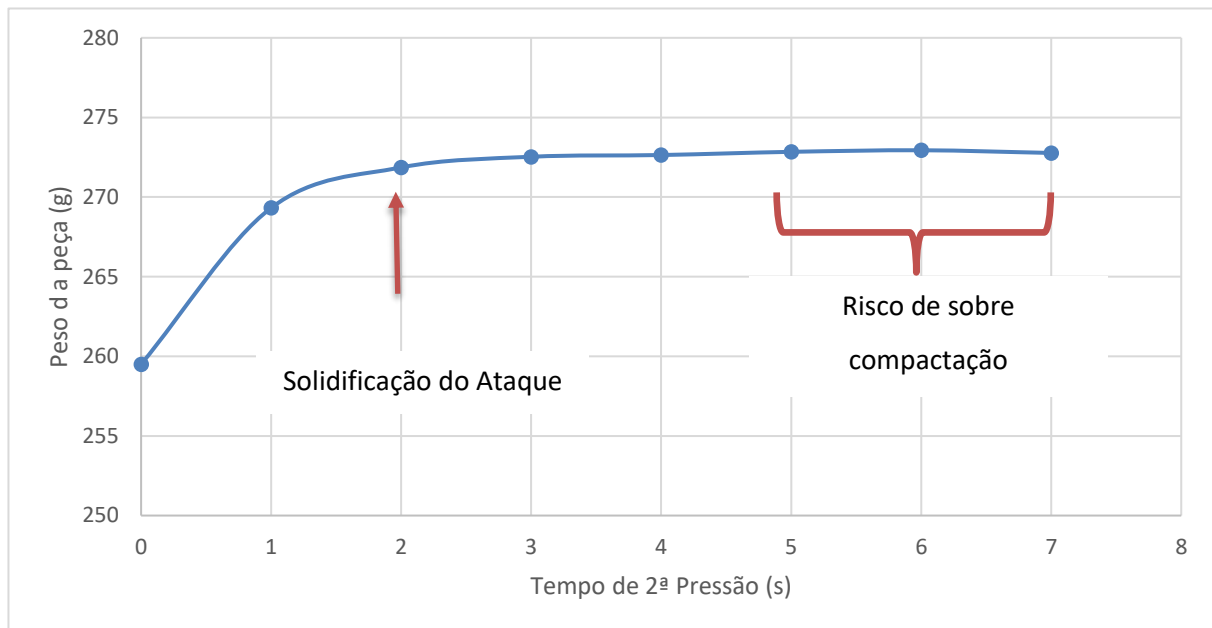


Figura 52-Gráfico de solidificação do ataque

5.1.5 Determinação do Tempo de Arrefecimento

Segundo o gráfico da Figura 53, observa-se que ambas as dimensões (comprimento e largura) sofrem alterações com a variação do tempo de arrefecimento.

A variação das dimensões no comprimento é praticamente linear, ou seja, com o aumento do tempo de arrefecimento, as dimensões também aumentam.

Porém, no caso das dimensões da largura, as variações das mesmas não ocorrem de forma tão linear com o aumento do tempo de arrefecimento.

Deduz-se que, neste caso, as dimensões de comprimento sejam mais sensíveis à variação do tempo de arrefecimento, do que as dimensões da largura. Por outro lado, descartando o "desvio" que ocorre na dimensão da largura nos 16 segundos de arrefecimento, de uma forma geral, a relação de largura com tempo de arrefecimento pode considerar-se linear, pois os valores da largura aumentam com o aumento do tempo de arrefecimento, mas não tão linearmente como o comprimento.

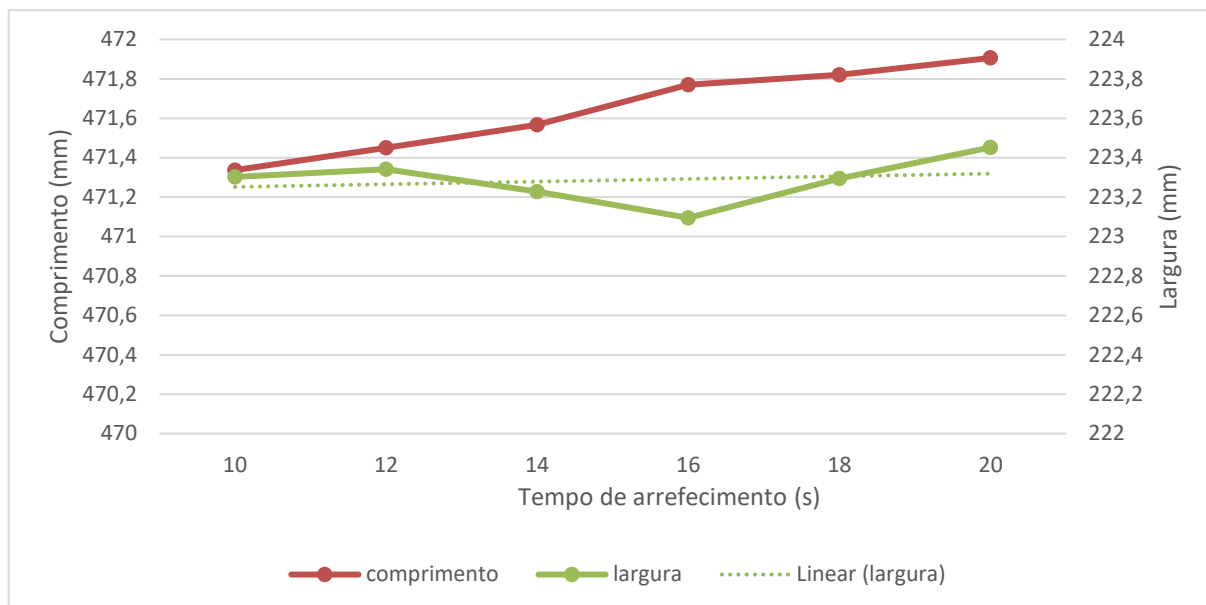


Figura 53- Gráfico de determinação de tempo de arrefecimento

Condições finais

Na Tabela 8, estão representados os valores das condições utilizados nos testes experimentais e simulações.

Tabela 8- Condições Utilizadas nos testes experimentais e nas simulações

Condição	Valor
Pressão de Injeção	110 bar
Velocidade de Injeção	70 %
2ª Pressão	77 bar
Tempo de 2ª Pressão	3 segundos
Dosagem	85 mm
Tempo de Arrefecimento	20 segundos

5.2 Análise de Resultados Simulações

Neste capítulo são analisados todos os resultados referentes às simulações efetuadas no programa Moldex 3D. Nas simulações manteve-se uma pressão de injeção equivalente a 110 Bar e um tempo de arrefecimento de 20 segundos.

É importante salientar que se analisou a percentagem de contribuição de enchimento de cada um dos pontos de ataque, representada na Figura 54. O ponto de ataque superior é responsável pelo enchimento de aproximadamente 65% da peça, daí este ser o ponto de maior diâmetro (cerca de 1,5mm), enquanto o inferior apenas enche cerca de 35%. Esta diferença de percentagem de enchimento pode sofrer a contrapartida de a zona preenchida pelo engate de maior diâmetro sofrer compactação excessiva e/ou, a zona do engate menor não ter material suficiente para um correto enchimento (dando origem a defeitos como chupados). Para além disto, a zona de encontro do fluxo ocorre no centro da peça (Figura 54 à direita) e esta é a área mais frágil da peça.

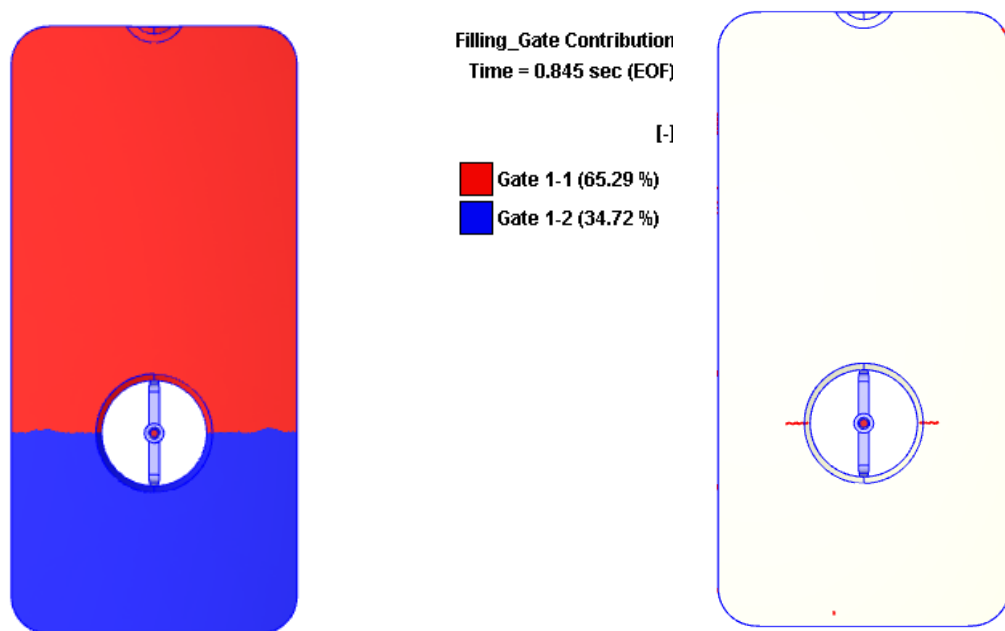


Figura 54-Percentagem de contribuição de cada um dos pontos de ataque (à esquerda) e linha de soldadura (à direita)

5.2.1 Empeno

Analisando o gráfico da Figura 55, conclui-se que

- As simulações dos ensaios 2,3,5, 8, 9, 12 ,14 e 15 apresentam todos empenos acima de 2mm e alguns até acima dos 3,5 mm na zona central da peça. Em todos estes casos a 2ª pressão é de 90 bar.

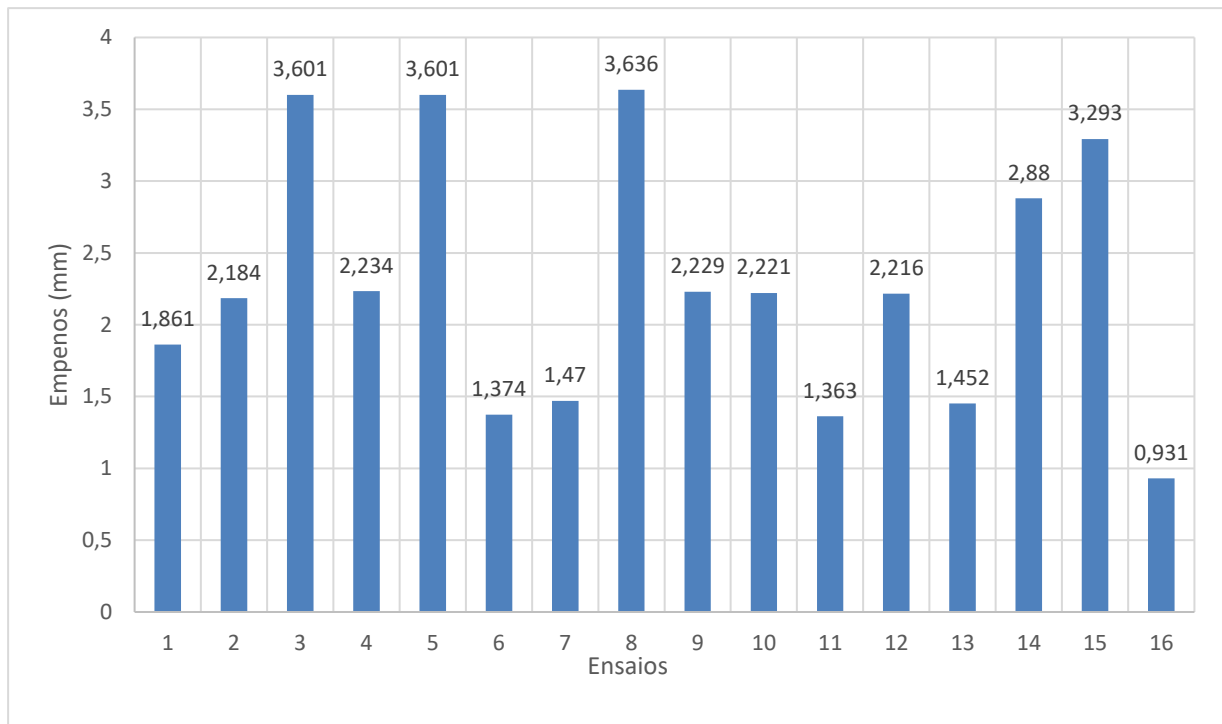


Figura 55-Gráfico de valores de empenos das Simulações

- Analisando a Figura 57 e a Figura 56, que são correspondentes aos ensaios 2 ,3,5, 8, 9, 12,14 e 15, verifica-se que os empenos ocorrem mais perto da zona do ataque superior (zona a verde) e mais um pouco na extremidade da peça.
- Na Figura 56 (simulações correspondentes aos ensaios 2, 3,5 e 8) observa-se que os empenos mais acentuados (zona a verde) ocorrem mais perto da zona do ataque superior e mais um pouco nas extremidades da peça. Estas 4 peças foram simuladas com temperatura do molde de 40°C.

Na Figura 57, com as simulações dos ensaios 9,12,14 e 15, os maiores empenos são localizados nas novamente, perto da zona do ataque superior (zona a verde) e mais um pouco na extremidade da peça. Porém comparativamente às simulações da Figura 56, os empenos destes ensaios são na sua maioria menores que os empenos observados nos 2,3,5 e 8. A temperatura do molde utilizada nestas simulações foi de 70°C.

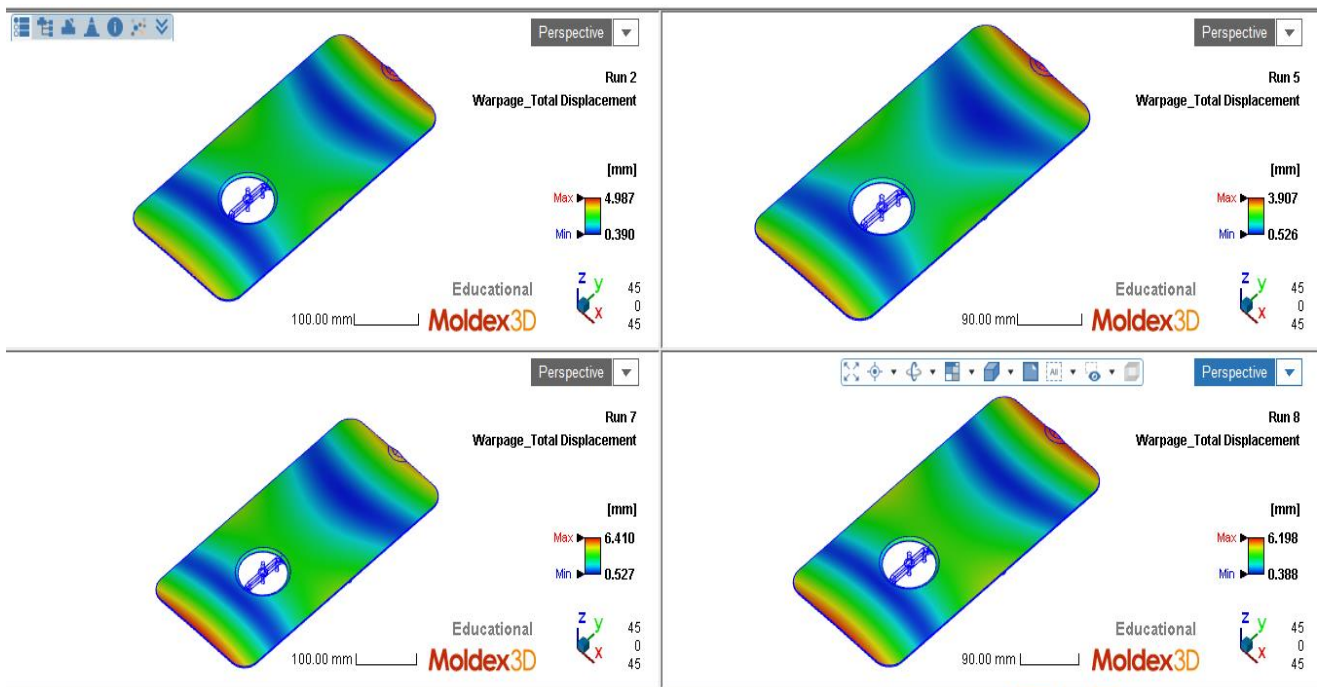


Figura 57-Empenos das simulações dos ensaios 9, 12 14 e 15

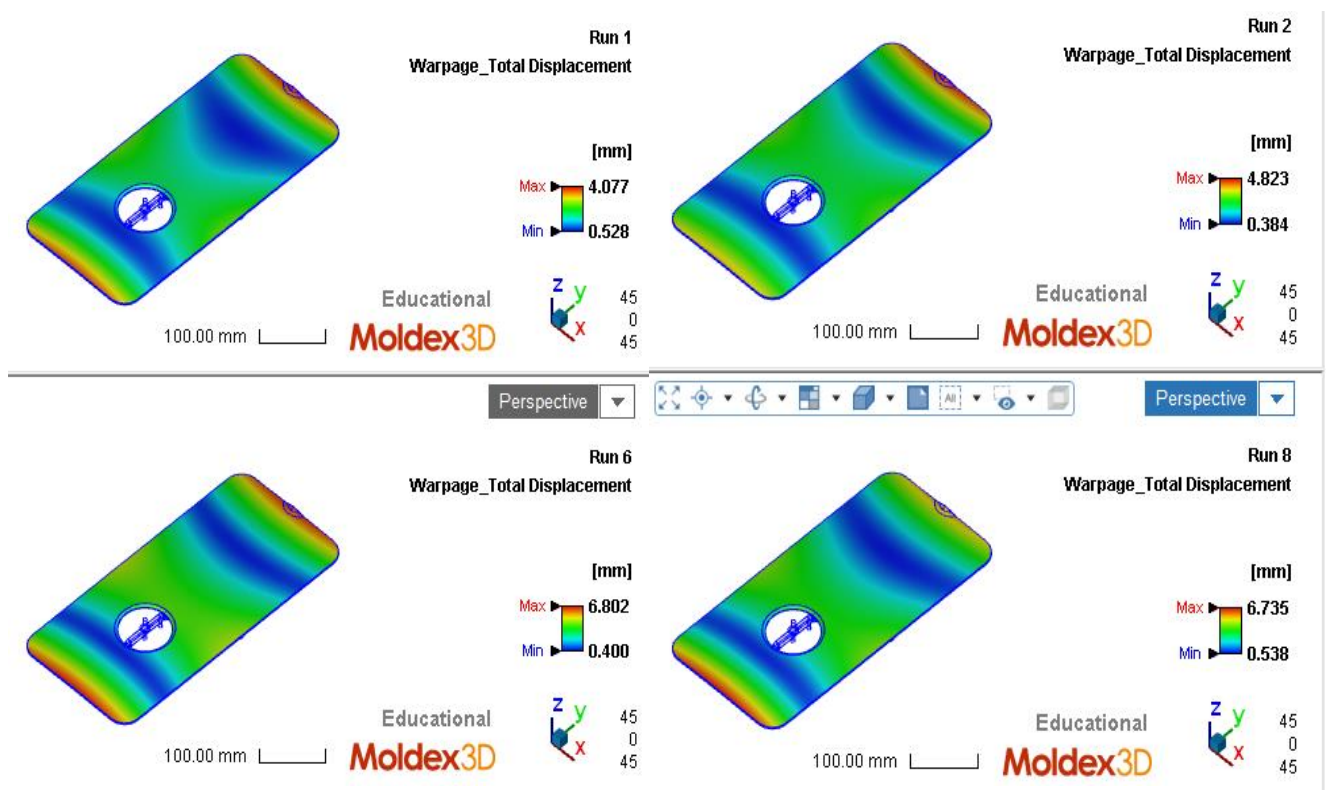


Figura 56- Empenos das simulações 2,3,5 e 8

- As peças das simulações 2 e 12 (Figura 58), apresentam a área de empenos mínimos maior comparativamente às restantes. Ambas foram simuladas com 2ª Pressão de 90 bar, temperatura de fundido de 220°C e velocidade de injeção de 99%.

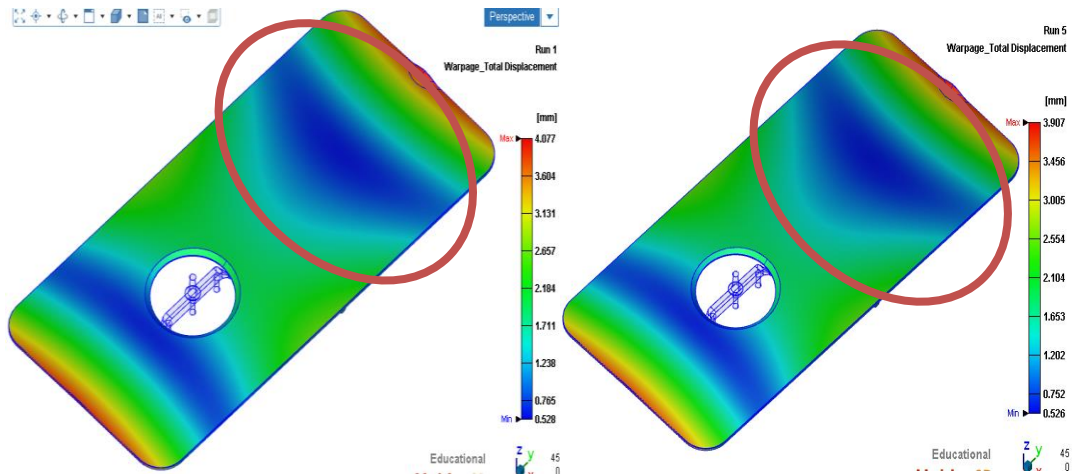


Figura 58-Simulações dos ensaios 2 e 12

- As simulações 4 e 10 (representadas na Figura 59 e Figura 60) apresentam menor empeno na zona próxima ao ataque de maior contribuição para o enchimento, porém ao longo da peça apresentam empenos na casa dos 2mm. Em ambas as experiências, as simulações foram realizadas com a 2ª Pressão a 25 bar e a velocidade de injeção a 99 %.

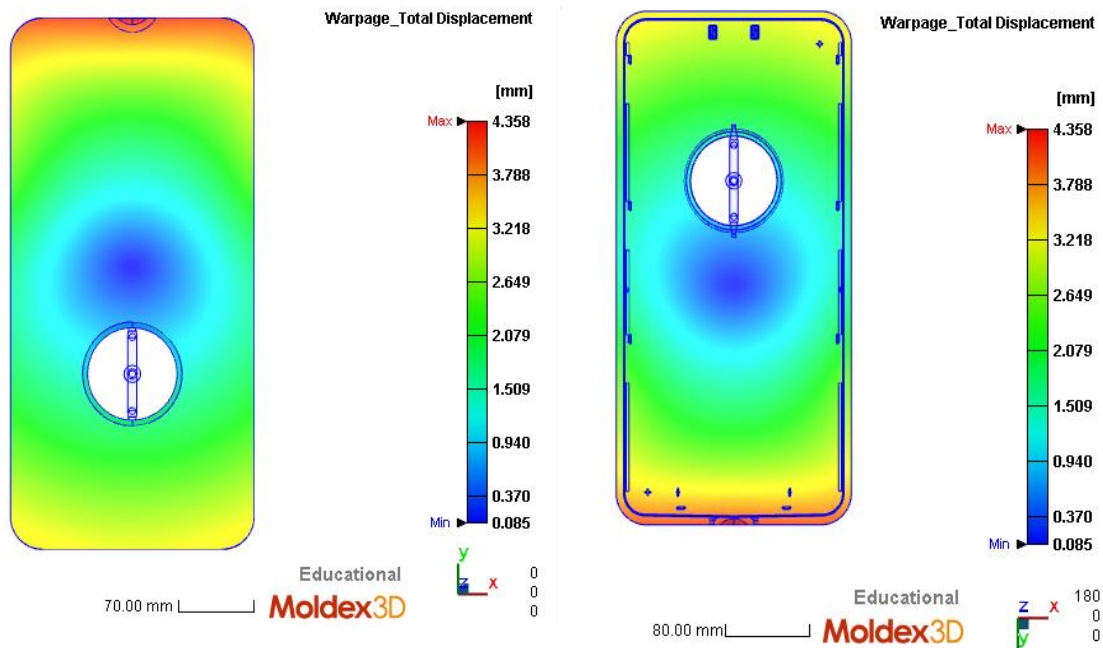


Figura 59-Empenos das simulações do ensaio 10

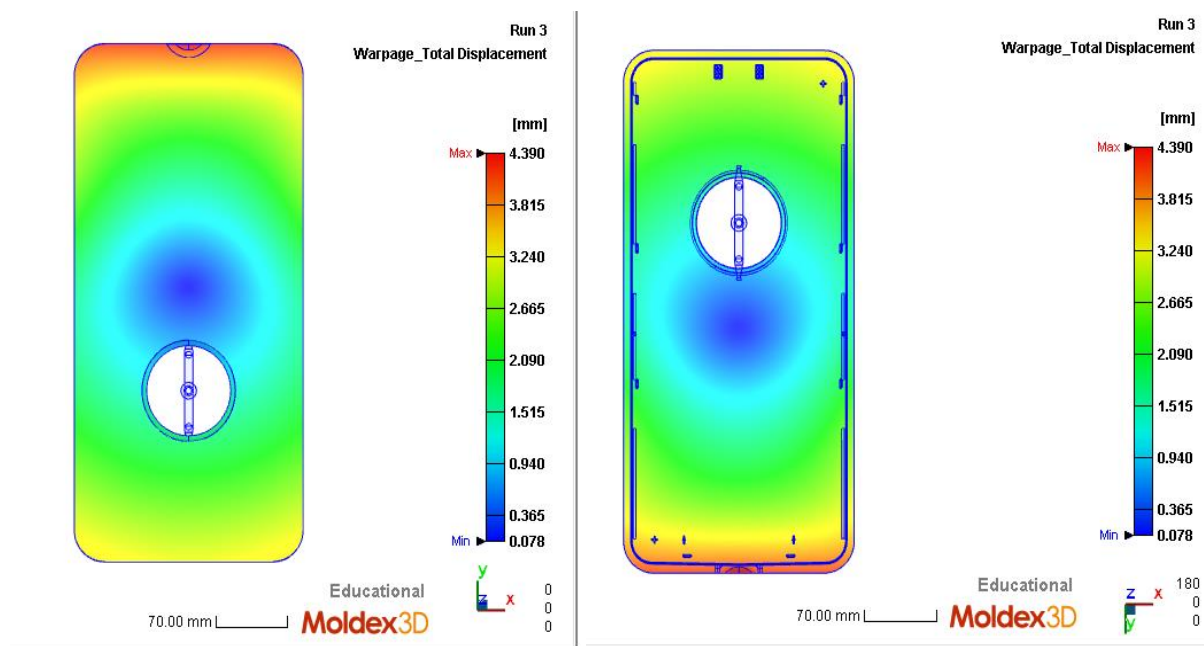


Figura 60-Empeno da simulação do ensaio 4

As simulações correspondentes aos ensaios das peças 6 e 16 (Figura 61) apresentam empenos inferiores a 2 mm no centro da peça, e empenos na casa dos 2 mm nas extremidades e periferias da mesma. Em ambos os casos, a 2ª pressão utilizada foi de 25 bar, a velocidade de injeção foi de 99 %, e temperatura de fundido é de 240 °C.

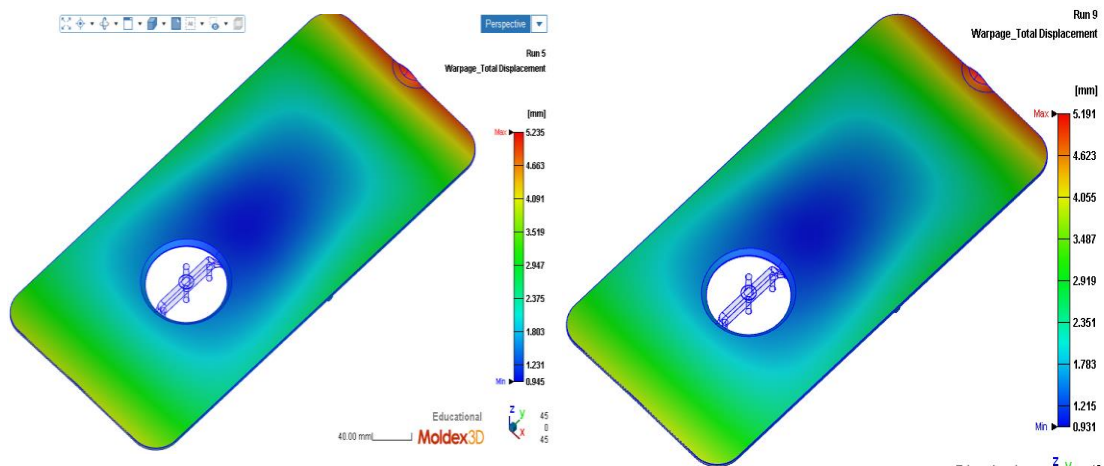


Figura 61-Simulações 6 e 16

Nas simulações correspondentes aos ensaios 1, 7, 11 e 13 (Figura 62) para além de a 2ª pressão ser de 25 bar, o valor de velocidade de injeção é de 20 %, e estes são os que apresentam valores de empeno de cerca de 2mm ou menos em praticamente toda a peça

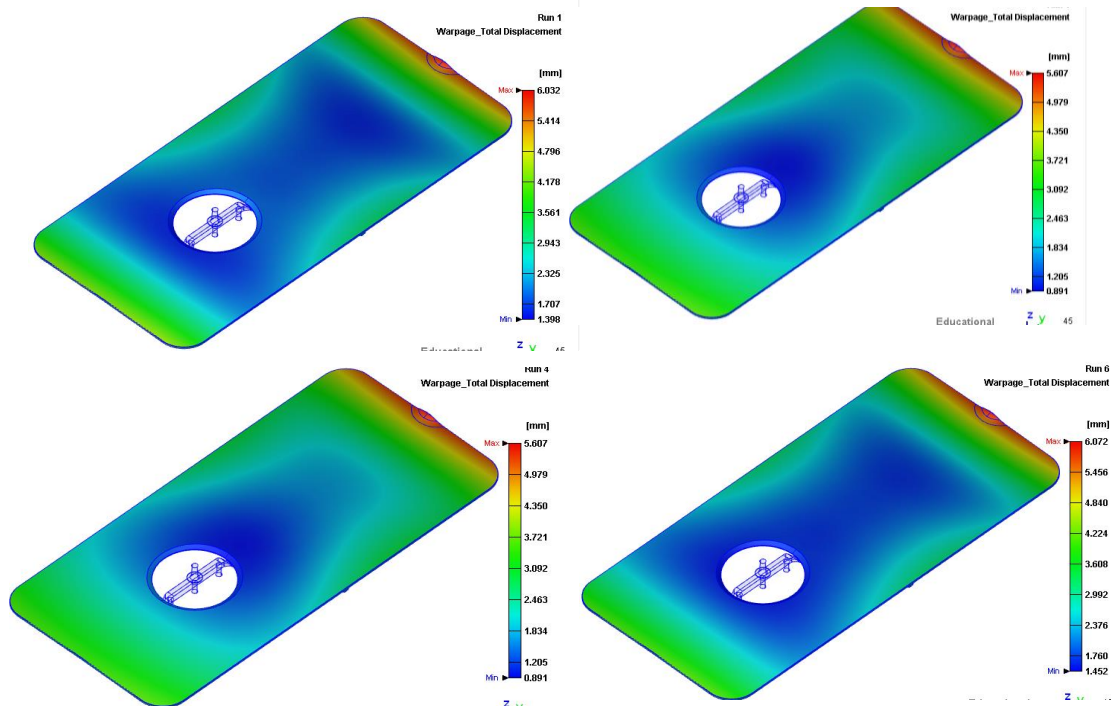


Figura 62-Simulações 1,7 ,11 e 13

ANOVA

Na Tabela 9 valores de p inferiores a 0,050 indicam que o respetivo fator é significativo para a variação da resposta em questão. Neste caso, os fatores determinantes são a temperatura

do molde, a 2ª pressão e da interação entre temperatura do fundido com a 2ª pressão, possuem valores de p inferiores a 0,05.

Tabela 9- Tabela ANOVA da variação de empenos (simulações)

Response 2: empeno

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	11,73	14	0,8380	262,51	0,0483	significant
A-Temperatura do Molde	0,7123	1	0,7123	223,15	0,0426	
B-Temperatura do fundido	0,0331	1	0,0331	10,38	0,1916	
C-Temperatura de extração	0,0555	1	0,0555	17,37	0,1499	
D-Velocidade de Injeção	0,0891	1	0,0891	27,91	0,1191	
E-2ª pressão	7,20	1	7,20	2255,83	0,0134	
AB	0,0066	1	0,0066	2,08	0,3859	
AC	0,5256	1	0,5256	164,66	0,0495	
AD	0,0645	1	0,0645	20,21	0,1393	
AE	0,1282	1	0,1282	40,15	0,0997	
BC	0,0502	1	0,0502	15,72	0,1573	
BD	0,0396	1	0,0396	12,41	0,1761	
BE	1,98	1	1,98	621,02	0,0255	
CE	0,4768	1	0,4768	149,36	0,0520	
DE	0,3666	1	0,3666	114,85	0,0592	
Residual	0,0032	1	0,0032			
Cor Total	11,73	15				

Efeito da Temperatura do Molde

O gráfico do efeito da Figura 63, mostra que com o aumento da temperatura do molde, a intensidade de empenos tem tendência a diminuir.

empeno (mm)

X1 = A

Actual Factors

B = 230

C = 75

D = 59,5

E = 57,5

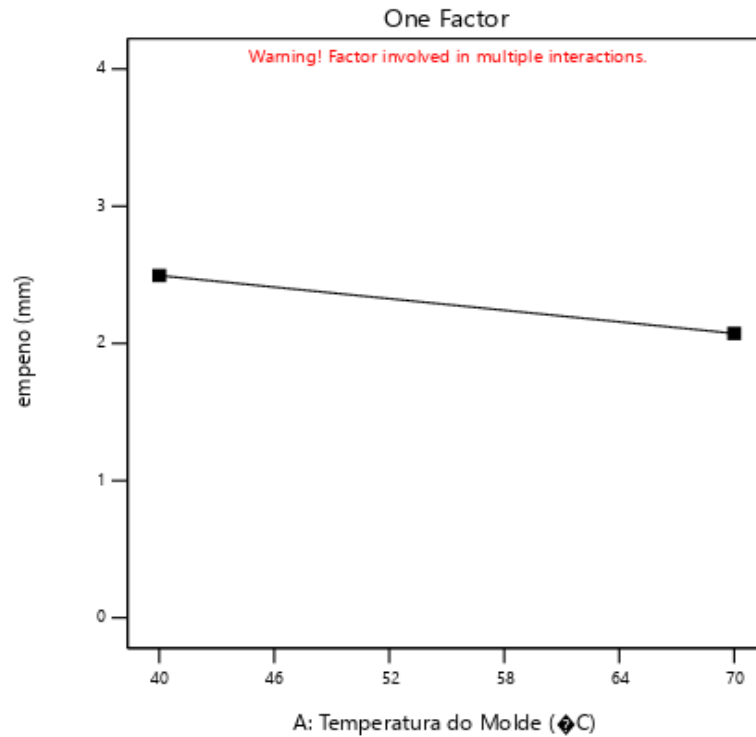


Figura 63-Efeito da temperatura do molde na variação de empenos

Efeito da 2ª Pressão

Na Figura 64, observa-se o efeito da 2ª pressão no aparecimento de empenos. Neste caso, o aumento da 2ª pressão causa o aumento do empeno (representado pela linha a preto), uma vez que, quanto maior o valor de 2ª pressão, maior a compactação do material, o que pode levar à sobre compactação do mesmo originando internas, e por consequência, maior o empeno.

empeno (mm)

X1 = E

Actual Factors

A = 55

B = 230

C = 75

D = 59,5

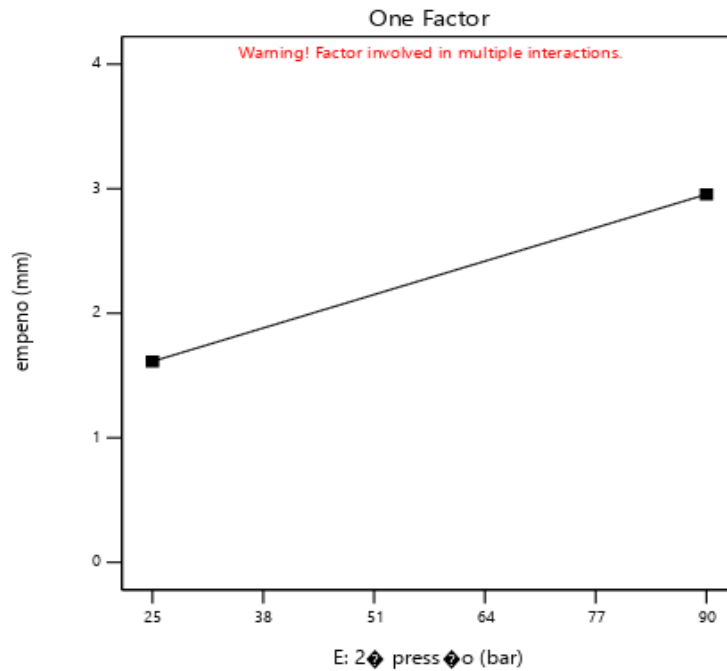


Figura 64- Efeito da 2ª Pressão no aparecimento de empenos

Interação entre 2ª Pressão e Temperatura do Fundido

Agora, analisando o gráfico da Figura 65, percebe-se que no caso de se aplicar o valor máximo do intervalo da 2ª Pressão (90 bar) os empenos irão aumentar com o aumento da temperatura do fundido (linha vermelha). Porém, no caso de o valor de 2ª Pressão a ser aplicado ser de 25 bar, o aumento da temperatura do fundido, provocará uma diminuição da intensidade dos empenos (linha a preto).

Sendo a temperatura do fundido de 220°C ou de 240°C, a utilização de 90 bar de 2ª Pressão causa mais empenos comparativamente à utilização de 25 bar de 2ª Pressão, pois, como já mencionado anteriormente, o facto de a 2ª Pressão ser mais alta, causa sobre compactação do material levando à aparição e empenos.

empeno (mm)

X1 = B

X2 = E

Actual Factors

A = 55

C = 75

D = 59,5

■ E- 25
▲ E+ 90

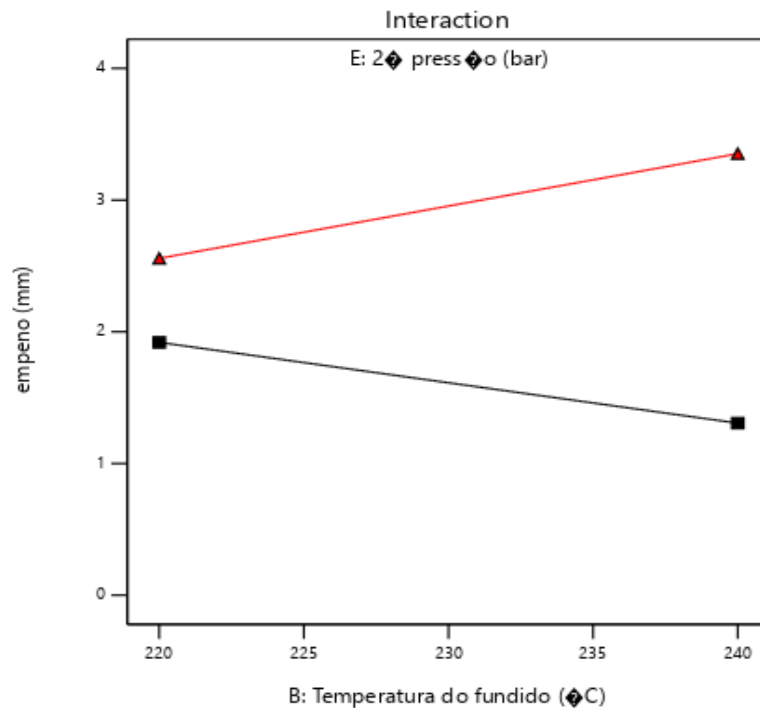


Figura 65-Efeito da Interação entre Temperatura do fundido e 2ª pressão no aparecimento de empenos

Percentagem de Contribuição

A temperatura do fundido contém 6% de contribuição para o aparecimento de empenos. A 2ª Pressão contribui em 61% e a percentagem de contribuição da interação entre temperatura do molde e temperatura de extração é de 4,48 %.

5.2.2 Variação de peso

Analisando a Figura 66, observa-se que:

- Os ensaios 3, 9 e 15 apresentam massas superiores a 255 gramas e em todos estes ensaios a velocidade de injeção é a mínima do intervalo selecionado (20%) e a 2ª Pressão é a máxima (90 bar). A 2ª pressão serve para injetar mais material para o interior da cavidade, de forma a compensar possíveis contrações volumétricas que possam ocorrer, desta forma, quanto maior o valor de 2ª pressão, maior será a quantidade de

material forçado para a cavidade e naturalmente, maior será a massa volúmica da peça.

- Os ensaios que apresentam menor peso (cerca de 250 gramas) são efetivamente os ensaios 5,8,14 e 16 que foram simulados com a temperatura do fundido a 240º C.
- Todos os ensaios cujo peso deu muito próximo de 254 gramas (ensaios 1,6,7,11 e 13) foram simulados com 2ª pressão de 25 bar.
- Os restantes ensaios (2,4,10 e 12) apresentam 252 ou 253 gramas foram simulados com uma temperatura de fundido de 220ºC e com velocidade de injeção de 99 %.

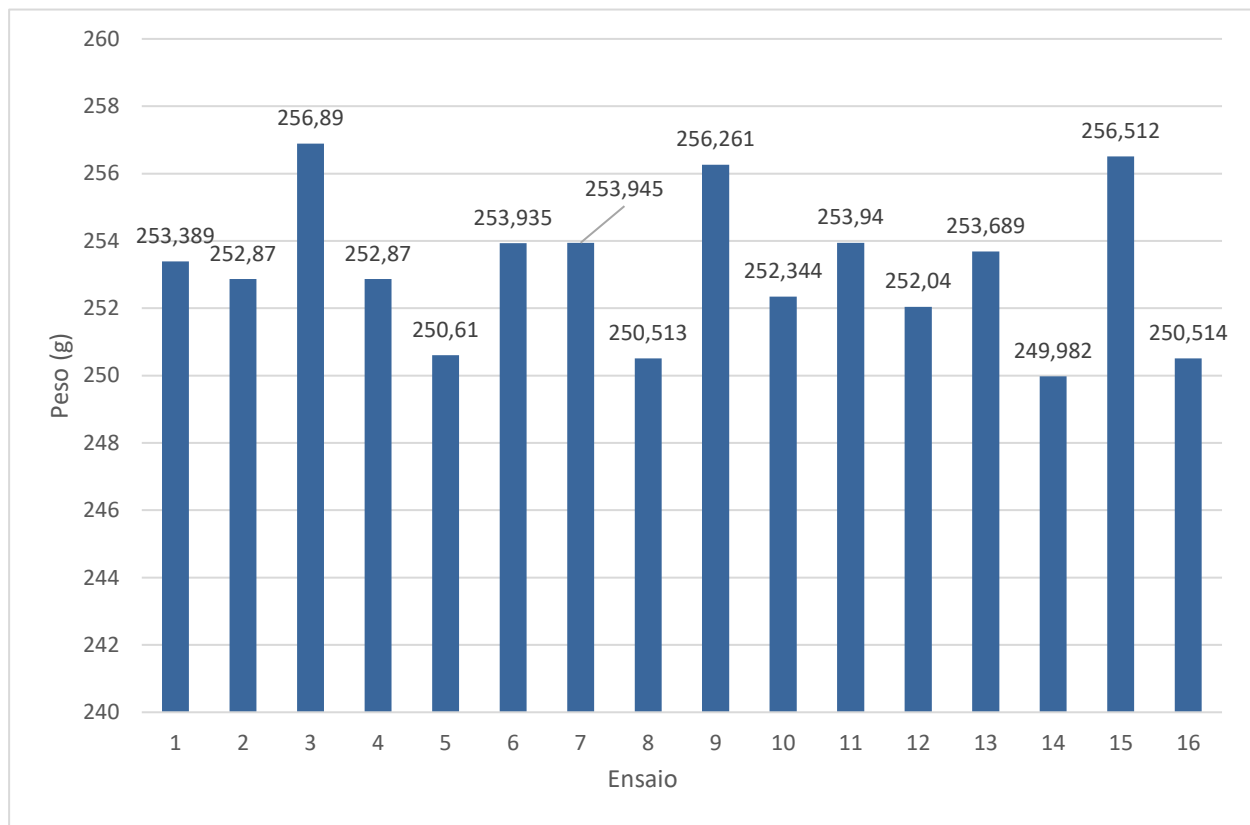


Figura 66- Variação do peso das peças simuladas em Moldex

ANOVA

Analisando a Tabela 10, o único fator com valor de p inferior a 0,05 é a velocidade de injeção, logo, apenas este fator contribui significativamente para a variação do peso das peças das simulações em Moldex.

Tabela 10-Tabela ANOVA da variação do peso (simulações)

Response 1: peso

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	68,56	13	5,27	9,93	0,0951	not significant
A-Temperatura do Molde	0,0042	1	0,0042	0,0080	0,9370	
B-Temperatura do fundido	7,43	1	7,43	14,00	0,0646	
C-Temperatura de extração	1,07	1	1,07	2,02	0,2910	
D-Velocidade de Injeção	25,42	1	25,42	47,89	0,0203	
E-2º pressão	0,0692	1	0,0692	0,1303	0,7527	
AD	7,39	1	7,39	13,93	0,0649	
AE	3,58	1	3,58	6,74	0,1219	
BC	0,3576	1	0,3576	0,6736	0,4981	
BD	0,0185	1	0,0185	0,0348	0,8691	
BE	6,23	1	6,23	11,74	0,0757	
CD	6,93	1	6,93	13,06	0,0688	
CE	4,33	1	4,33	8,15	0,1039	
DE	5,72	1	5,72	10,78	0,0816	
Residual	1,06	2	0,5309			
Cor Total	69,62	15				

Efeito da velocidade de Injeção

Da Figura 67, interpreta-se que com o aumento da velocidade de injeção, o peso diminui. Esta diminuição de massa, pode estar relacionada com o facto que quanto mais rápida a entrada do material, mais rápido o contacto entre o material e as paredes do molde, logo mais rápido será o arrefecimento e solidificação do material impedindo o fluxo de mais material.

peso (g)

X1 = D

Actual Factors

A = 55

B = 230

C = 75

E = 57,5

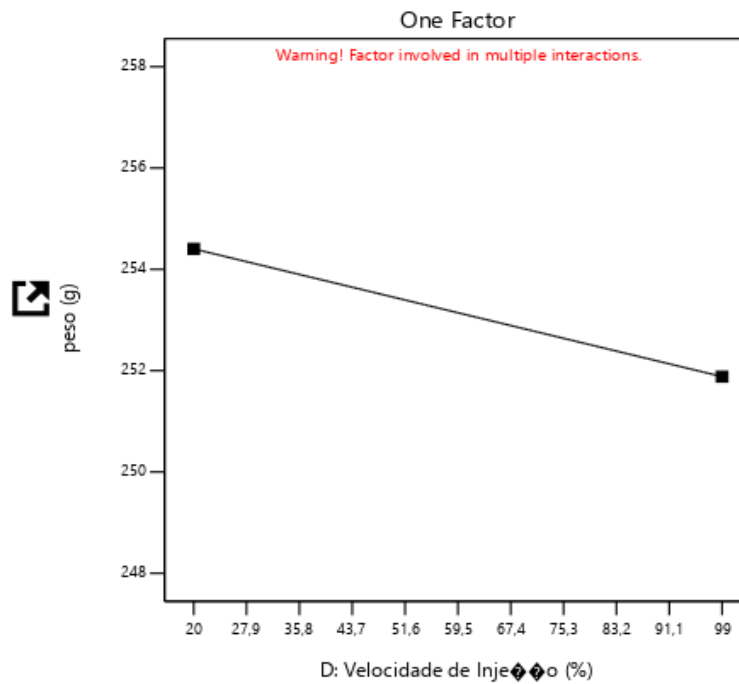


Figura 67-Efeito da velocidade de injeção na variação do peso (simulações)

Percentagem de Contribuição

A velocidade de injeção contém uma percentagem de contribuição de 36,5%.

5.2.3 Variação do Tempo de Ciclo

Neste caso, as conclusões da análise da Figura 68 são diretas.

- Nas simulações efetuadas com velocidade de 20 % o tempo de ciclo deu 42,201 segundos, e quando a velocidade utilizada foi de 99 % o tempo passou a 39,112 segundos. Uma velocidade de injeção maior irá encurtar o tempo de ciclo, obviamente uma velocidade de injeção menor irá prolongar o mesmo. Na variação de tempo de ciclo, o único fator determinante é naturalmente a velocidade de injeção.

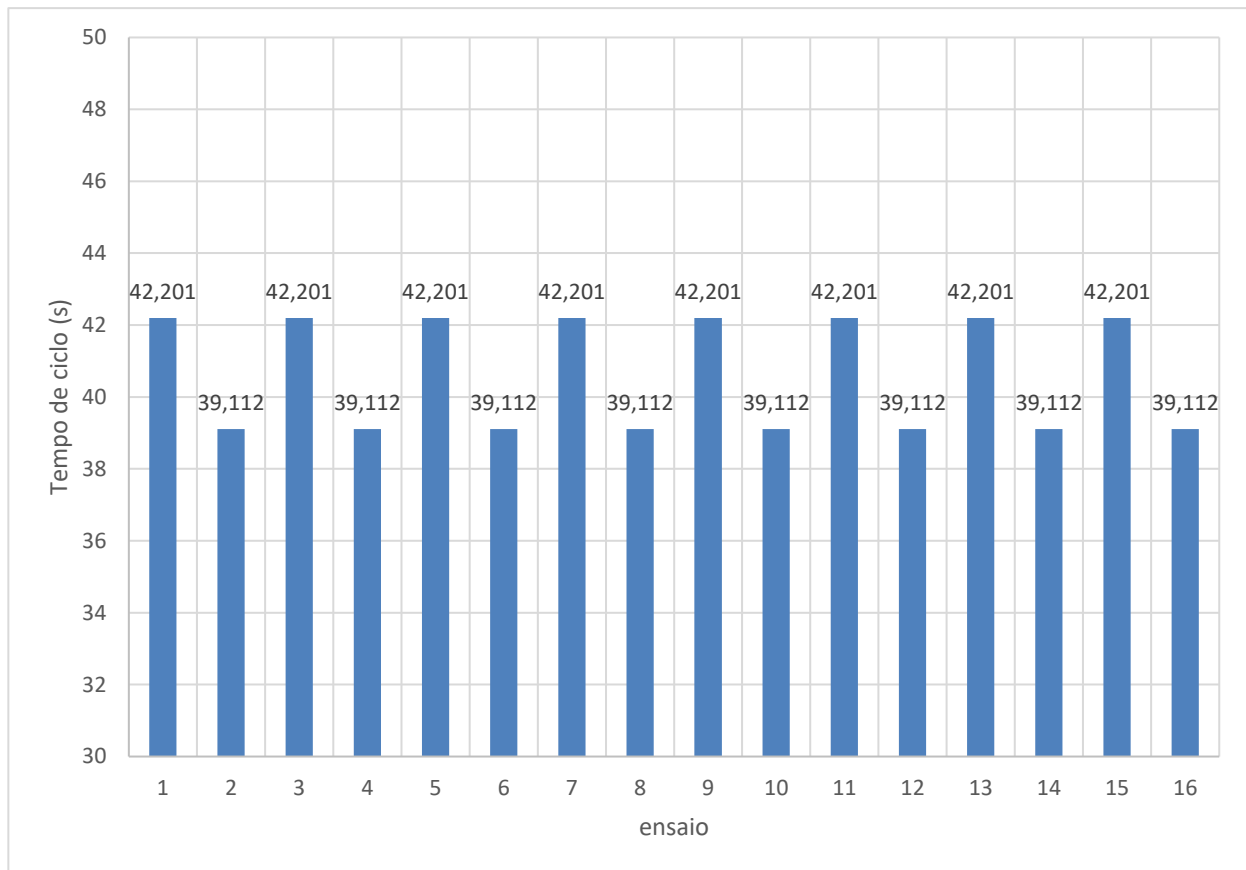


Figura 68- Gráfico da variação do tempo de ciclo nas simulações

Efeito da velocidade de Injeção

Neste gráfico da Figura 69, observa-se que a relação entre tempo de ciclo e aumento da velocidade de injeção é diretamente proporcional. Neste caso, quanto maior a velocidade de injeção menor o tempo de ciclo.

tempo de ciclo (s)

X1 = D

Actual Factors

A = 55

B = 230

C = 75

E = 57,5

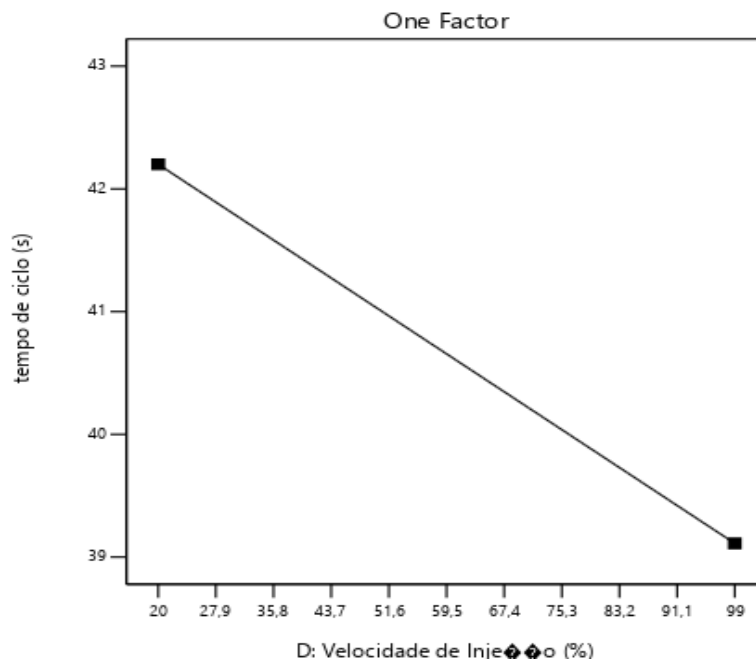


Figura 69-Efeito da velocidade de injeção na variação do tempo de ciclo (simulações)

Percentagem de Contribuição

Posto isto, é notório que a velocidade de injeção contribui em 100 % para a variação do tempo de ciclo das simulações em Moldex.

5.2.4 Análise e controlo de chupados

Após a análise de chupados da Figura 70 percebe-se que:

- As peças que apresentam zonas de chupados mais profundos (de cerca de 0,036mm), correspondem às simulações realizadas com 2ª Pressão de 25 bar (1,4,6,7,10,11,13 e 16). Os chupados eram mais notórios nas zonas dos castelos, engates e no contorno de toda a peça, como é notório na Figura 71 (à esquerda).
- Uma menor 2ª Pressão significa que entra menos material para o interior da cavidade para compensar eventuais contrações volumétricas.

Neste caso, as simulações efetuadas com 2ª Pressão de 90 Bar (2,3,5,7,9,11,13 e 15), apresentavam possíveis chupados na ordem dos 0,011mm, ou seja, muito menores comparativamente às simulações efetuadas com 25 Bar de 2ª Pressão.

Neste caso os castelos não são visíveis e os chupados aparecem apenas nas zonas dos engates e em alguns contornos da peça.

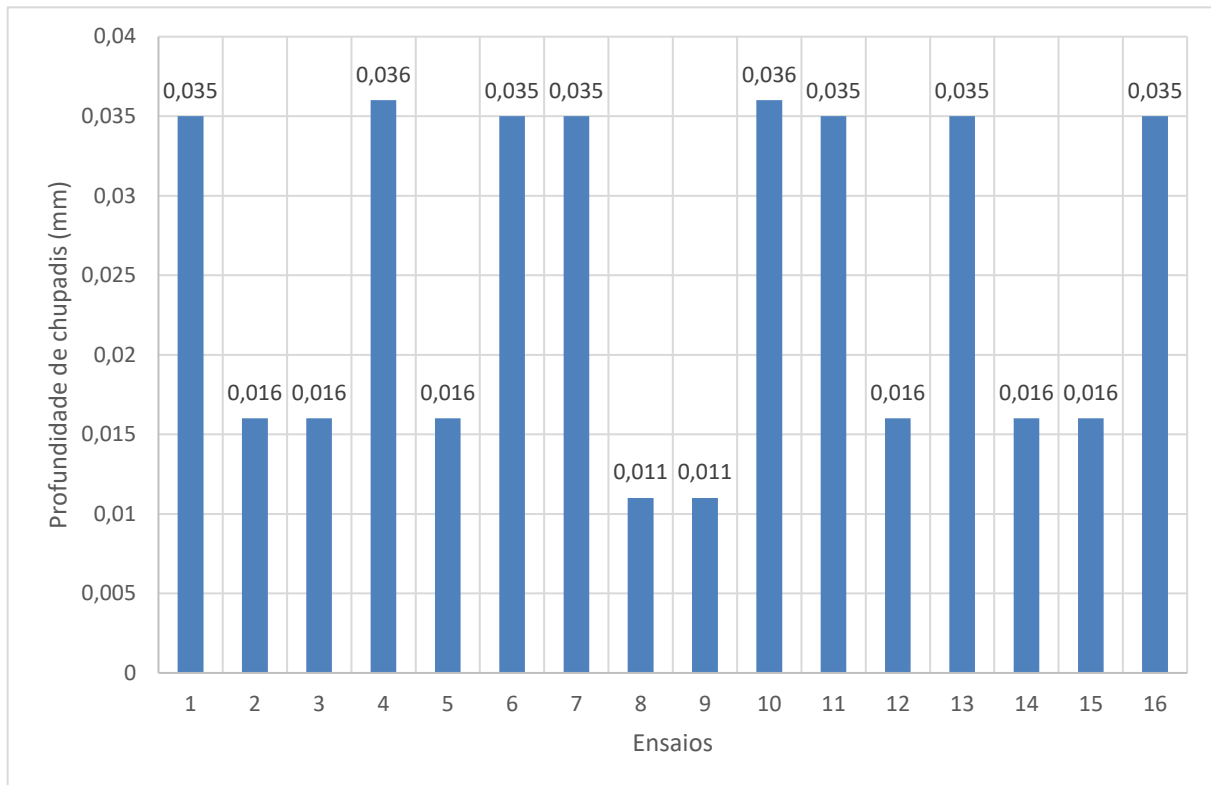


Figura 70- Gráfico da variação e chupados nas simulações

Na Figura 71, observa-se as peças 3 (à direita) e 4 (à esquerda) que foram simuladas com uma 2ª pressão de 90 e 25 bar respetivamente. É evidente que a peça 3 apresenta menos quantidades de chupados e menos profundos. Na peça 4, os castelos (na parte inferior da peça) são estão muito mais evidentes. Sendo assim, a pressão de 25 bar não é suficiente para compensar as contrações volumétricas da peça, e esta não fica suficientemente preenchida dando lugar a chupados

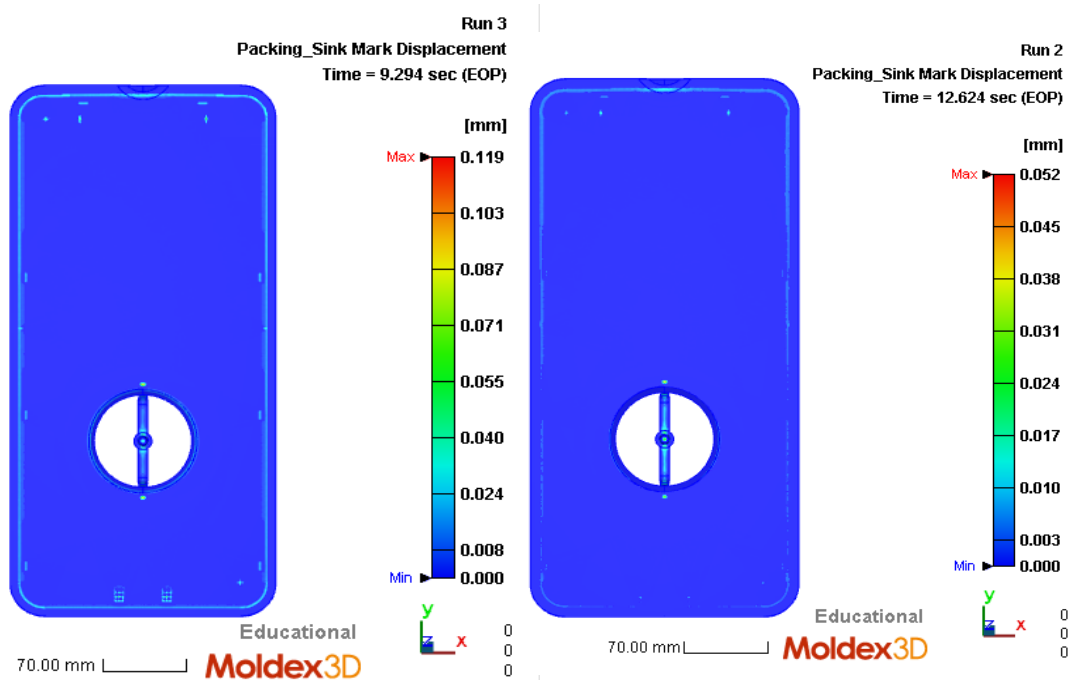


Figura 71- Chupados nas simulações da peça 4 (à esquerda) e da peça (à direita)

ANOVA

De entre todos os fatores, apenas a 2ª Pressão apresenta o valor de p inferior a 0,05, logo apenas a 2ª Pressão apresenta influência na aparição de chupados.

Tabela 11-Tabela ANOVA de aparecimento de chupados (simulações)

Response 7: chupados

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0,0017	14	0,0001	30,64	0,1408	not significant
A-Temperatura do Molde	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000	
B-Temperatura do fundido	2,500E-07	1	2,500E-07	0,0625	0,8440	
C-Temperatura de extração	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000	
D-Velocidade de Injeção	2,500E-07	1	2,500E-07	0,0625	0,8440	
E-2ª pressão	0,0017	1	0,0017	420,25	0,0310	
AB	6,250E-06	1	6,250E-06	1,56	0,4296	
AD	6,250E-06	1	6,250E-06	1,56	0,4296	
AE	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000	
BC	6,250E-06	1	6,250E-06	1,56	0,4296	
BD	9,000E-06	1	9,000E-06	2,25	0,3743	
BE	2,500E-07	1	2,500E-07	0,0625	0,8440	
CD	6,250E-06	1	6,250E-06	1,56	0,4296	
CE	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000	
DE	2,500E-07	1	2,500E-07	0,0625	0,8440	
Residual	4,000E-06	1	4,000E-06			
Cor Total	0,0017	15				

Efeito da 2ª Pressão

Tal como se observa na Figura 72, o aumento da segunda pressão provoca uma diminuição da profundidade de chupados. Com uma 2ª pressão mais alta, a quantidade de material que entra para a cavidade também aumenta, assim eleva-se a capacidade de compensar a contração volúmica que possa ocorrer, logo, a profundidade de chupados irá diminuir com o aumento da 2ª Pressão.

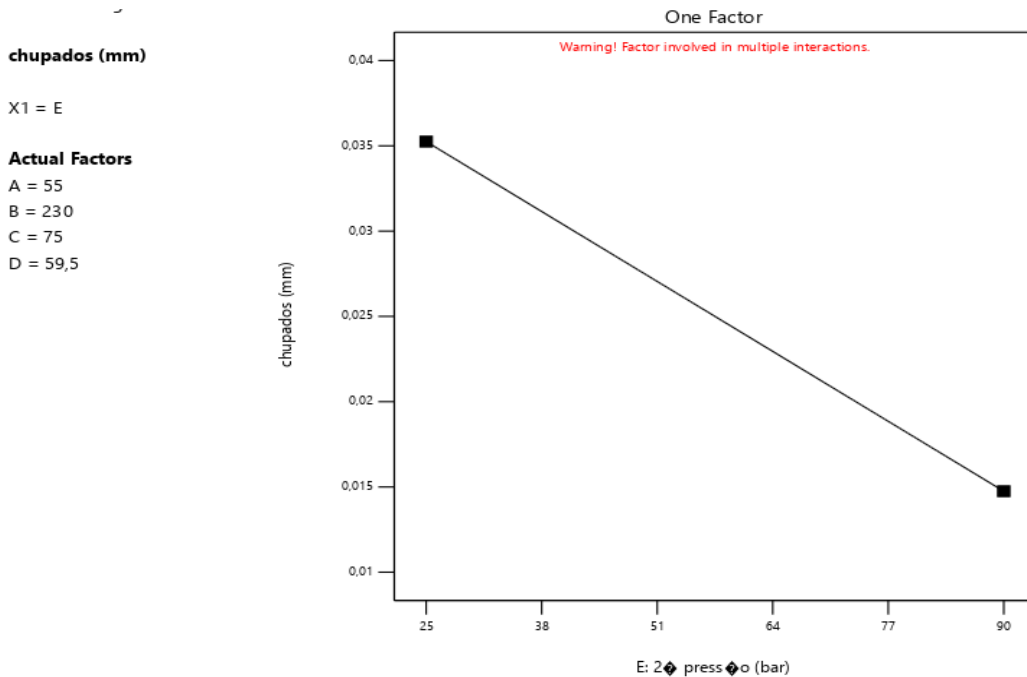


Figura 72-Efeito da 2ª Pressão na variação de chupados (simulações)

Percentagem de contribuição

A percentagem de contribuição da 2ª Pressão a variação de aparecimento de chupados é de quase 100%, ou seja, este fator é o único responsável pelo aparecimento de chupados nas peças.

5.3 Análise de Resultados dos Testes Experimentais

Nesta secção, apresentam-se os resultados dos testes experimentais realizados na empresa, com recurso a uma máquina de injeção.

5.3.1 Empeno

Através deste gráfico da Figura 74 tiram-se várias conclusões:

- As peças dos ensaios 2,5,9,10, 13 e 14 contêm todas o empeno menor que 3 mm. Estes ensaios foram realizados com a temperatura de extração menor (65°C).
- Algumas peças cuja temperatura de extração é de 85° C (ensaios 3, 8,11,12 e 15) apresentam um empeno superior a 4mm. Na Figura 73 observa-se a peça resultante do ensaio nº11 com um empeno de 5,33 mm.



Figura 73- Empeno da peça do ensaio 11

É possível ainda concluir que, alguns dos ensaios que contêm temperatura de extração de 65°C combinado com a menor velocidade de injeção (20 %) (ensaios 5, 9 e 13) apresentam um empeno inferior a 2mm.

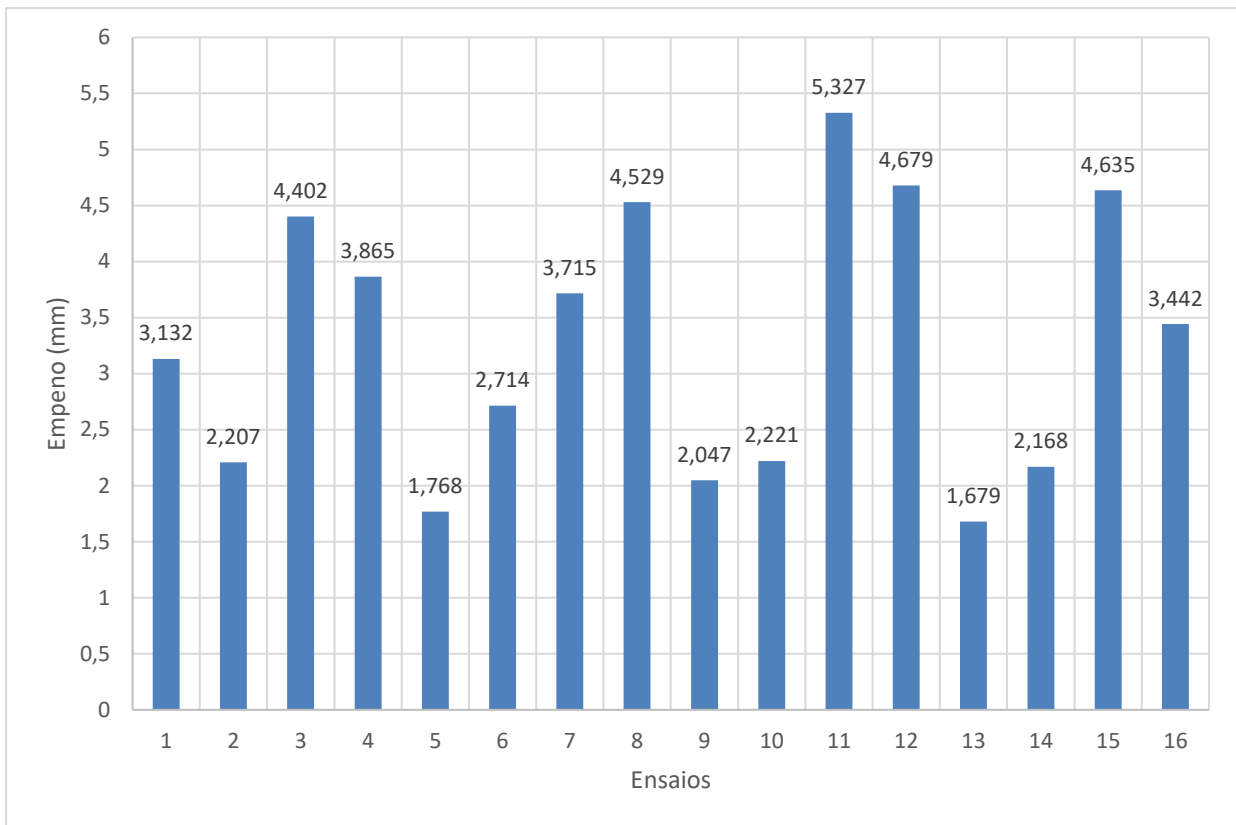


Figura 74- Gráfico da variação de empeno nas simulações

ANOVA

Através dos valores de p demonstrados na Tabela 12 entende-se que nos ensaios experimentais, o único fator responsável pela variação é a temperatura de extração, pois o seu valor de p é 0,0135.

Tabela 12- Tabela ANOVA de variação de empenos (testes experimentais)

Response 3: empeno

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	21,10	13	1,62	6,78	0,1357	not significant
A-Temperatura do Molde	0,0011	1	0,0011	0,0047	0,9517	
B-Temperatura do fundido	0,6521	1	0,6521	2,72	0,2407	
C-Temperatura de extração	17,34	1	17,34	72,42	0,0135	
D-Velocidade de Injeção	0,0484	1	0,0484	0,2021	0,6971	
E-2º pressão	0,0072	1	0,0072	0,0302	0,8781	
AB	0,1351	1	0,1351	0,5639	0,5310	
AC	0,6716	1	0,6716	2,80	0,2360	
AE	0,1190	1	0,1190	0,4970	0,5539	
BC	0,0284	1	0,0284	0,1186	0,7634	
BD	0,5595	1	0,5595	2,34	0,2660	
BE	0,4761	1	0,4761	1,99	0,2940	
CD	0,3158	1	0,3158	1,32	0,3696	
CE	0,7448	1	0,7448	3,11	0,2199	
Residual	0,4790	2	0,2395			
Cor Total	21,58	15				

Efeito da Temperatura de Extração

O gráfico representado na Figura 75, mostra que nos ensaios experimentais, o aumento da temperatura de extração, causa um aumento da profundidade dos empenos nas peças.

O facto de a temperatura de extração aumentar, faz com que ocorra um maior alívio de tensões durante a fase de arrefecimento, o que provoca empenos. Existe ainda a circunstância de a peça em estudo conter uma geometria complexa, o que faz com que aumente ainda mais a probabilidade de empenos ocorrerem.

empeno real (mm)

X1 = C

Actual Factors

A = 55

B = 230

D = 59,5

E = 57,5

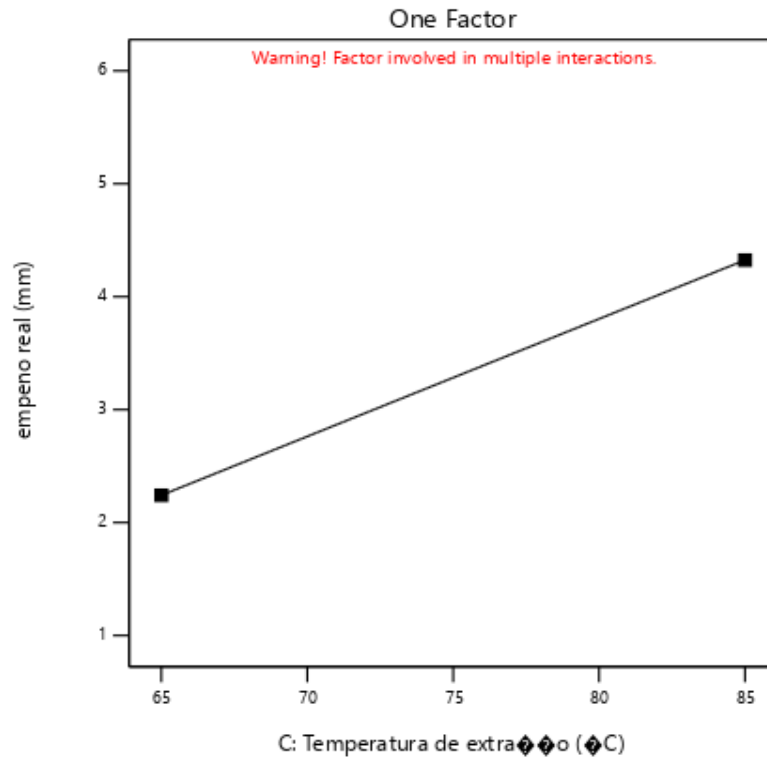


Figura 75-Efeito da temperatura de extração na aparição de empenos (testes experimentais)

Percentagem de Contribuição

A temperatura de extração apresenta 80% de contribuição na variação de empenos dos testes experimentais.

5.3.2 Variação do Peso das Peças

As conclusões retiradas através da análise deste gráfico da Figura 76 são as seguintes:

- Nos ensaios nº 4,6,10 e 16, a velocidade de injeção utilizada foi de 99 % e a 2ª pressão de 25 bar. Nestes casos, o peso das peças é inferior a 260 gramas, uma vez que, o material vai entrando na cavidade mais rapidamente, entra logo em contacto com as paredes mais frias do molde solidificando quase instantaneamente, impedindo a progressão de mais fluxo de material para o interior da cavidade. O facto de a 2ª Pressão ser de 25 bar, a quantidade de material a fim de compensar possíveis

contrações é reduzida e as peças acabam por conter menor massa comparativamente às peças injetadas com 2ª pressão de 90 bar.

- Já as peças dos ensaios 3,5,7,9 e 13 apresentam valores superiores a 270 gramas. Todas estas experiências foram processadas com uma velocidade de injeção de 20 %, mas os ensaios 3, 5 e 9 para além de possuírem a velocidade de injeção menor, contêm o valor de 2ª pressão superior do intervalo (90 bar) e são as peças mais densas. Como a velocidade com que o material é forçado para o interior da cavidade é menor, este não arrefece tão rapidamente e permite a entrada de mais material para compensar a contração volumétrica da peça durante o arrefecimento da mesma, o que faz com que a peça fique mais densa.

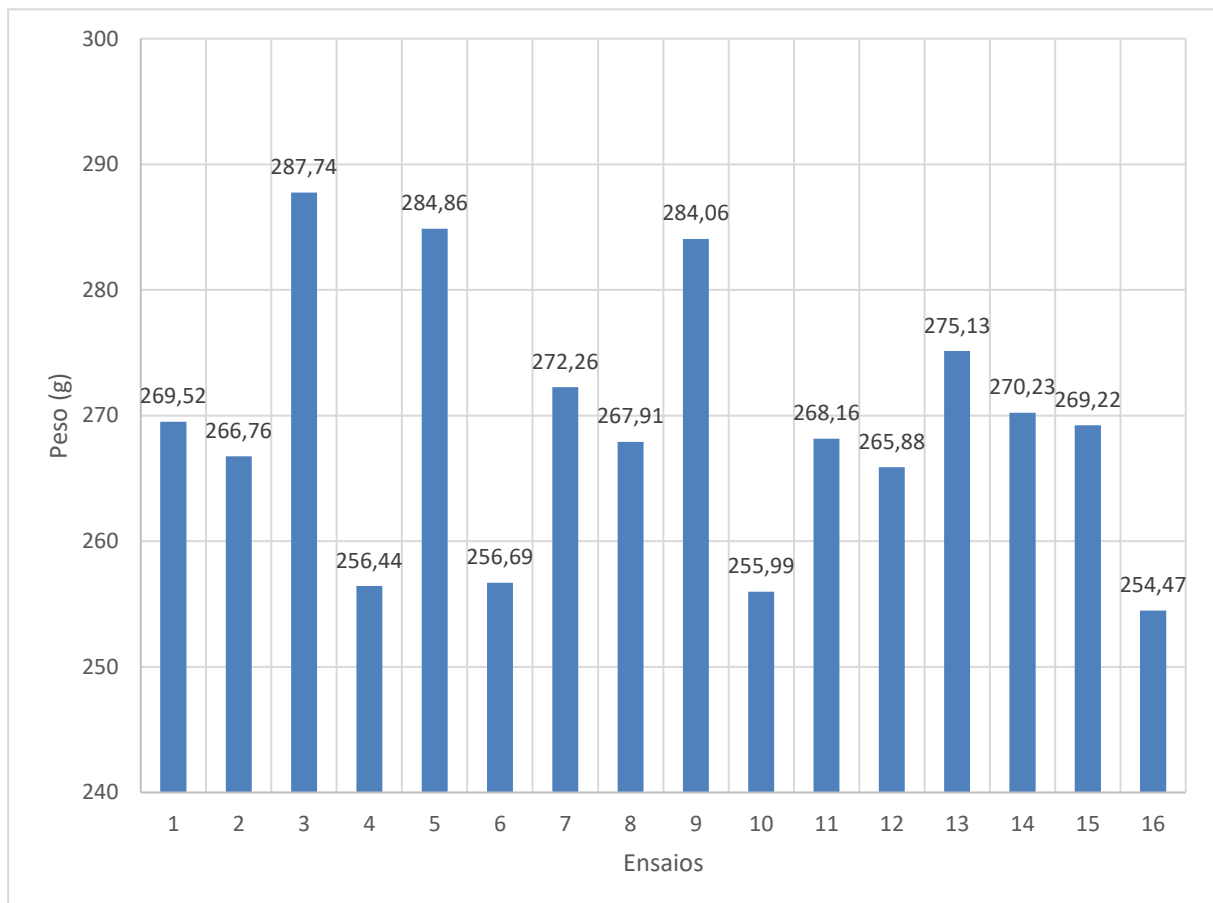


Figura 76- Variação do peso nos testes experimentais

ANOVA

Na Tabela 13, é evidente que neste caso não existe nenhum fator que seja, na sua totalidade, responsável pela variação de peso. Os menores valores de p , são da velocidade de injeção e

de 2ª Pressão, contudo, estão longe de valores que os considerem responsáveis pela oscilação de peso das peças.

Tabela 13-Tabela ANOVA de variação do peso (testes experimentais)

Response 5: peso

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1887,32	14	134,81	1,06	0,6524	not significant
A-Temperatura do Molde	0,0841	1	0,0841	0,0007	0,9836	
B-Temperatura do fundido	16,85	1	16,85	0,1323	0,7779	
C-Temperatura de extração	106,92	1	106,92	0,8395	0,5278	
D-Velocidade de Injeção	580,57	1	580,57	4,56	0,2788	
E-2º pressão	731,70	1	731,70	5,75	0,2516	
AB	12,08	1	12,08	0,0948	0,8098	
AC	184,96	1	184,96	1,45	0,4409	
AD	84,55	1	84,55	0,6639	0,5647	
AE	0,7569	1	0,7569	0,0059	0,9510	
BD	65,77	1	65,77	0,5165	0,6033	
BE	0,0132	1	0,0132	0,0001	0,9935	
CD	5,04	1	5,04	0,0396	0,8750	
CE	53,88	1	53,88	0,4230	0,6329	
DE	44,16	1	44,16	0,3467	0,6612	
Residual	127,35	1	127,35			
Cor Total	2014,67	15				

5.3.3 Variação do Tempo de Ciclo

Os resultados que se retiram da análise do gráfico da Figura 77 são que:

- Os ensaios 1,3,7,11,12 e 15 contêm tempos de ciclos superiores a 45 segundos e todos têm em comum o facto de o ensaio ser realizado com velocidade de injeção a 20 %.
- De entre os ensaios realizados com 20% de velocidade de injeção (1,3,5,7,9,11,13 e 15), a maioria dos ensaios realizados com uma temperatura de extração de 85°C apresentam mais 10 segundos de tempo de ciclo relativamente aos ensaios realizados com 65°C.

- Dentro dos ensaios realizados com velocidade de injeção de 20%, os ensaios realizados com temperatura de fundido de 220°C apresentavam (de uma forma geral) um tempo de ciclo ligeiramente superior aos ensaios realizados com 240°C de temperatura de fundido. A diferença de tempos de ciclos nestes casos é cerca de 10 a 20 segundos.

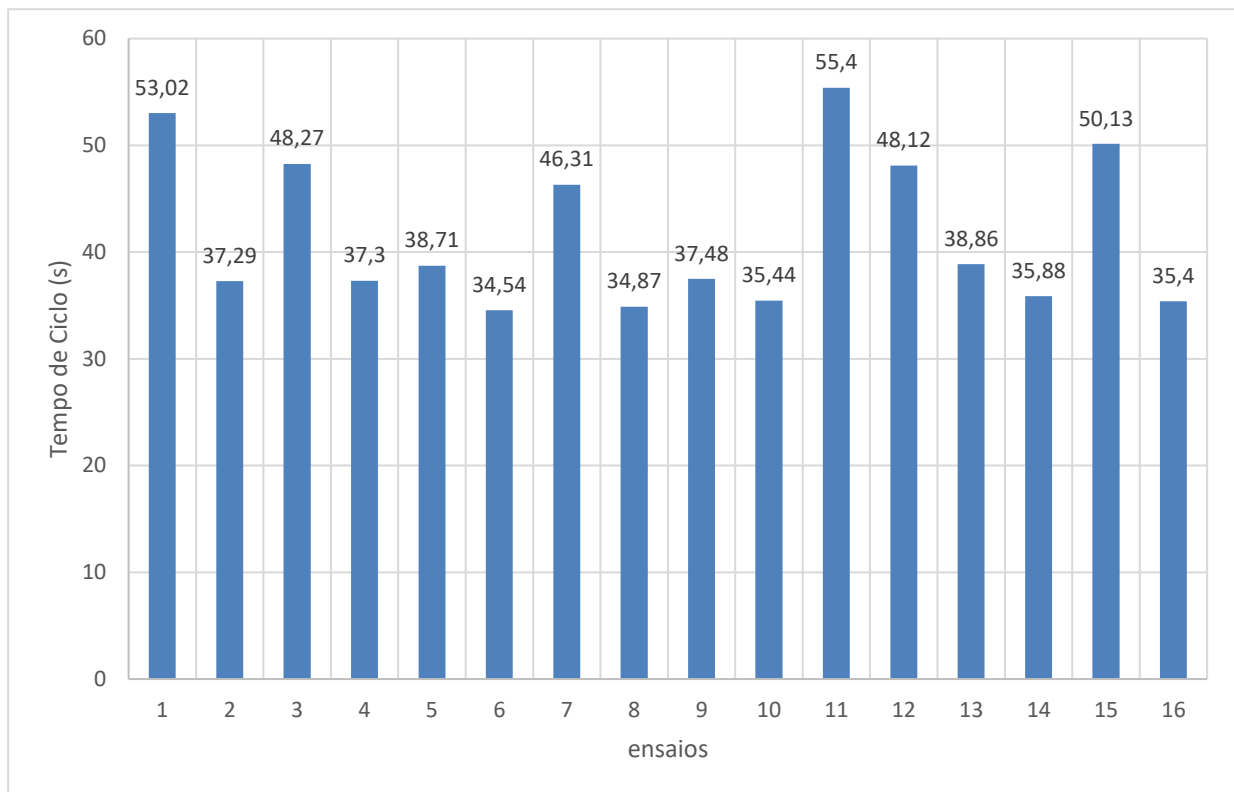


Figura 77-Variação do tempo de ciclo nos testes experimentais

ANOVA

Segundo a Tabela 14, não existe um fator que contribua significativamente para a variação do tempo de ciclo, nos testes experimentais.

Os fatores com menor valor de p são efetivamente a temperatura de fundido, temperatura de extração e velocidade de injeção, porém, nenhum contém percentagem de contribuição suficiente para influenciar a variação do tempo de ciclo.

Tabela 14- ANOVA de variação do Tempo de Ciclo

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1474,90	13	113,45	1,36	0,5021	not significant
A-Temperatura do Molde	3,94	1	3,94	0,0472	0,8482	
B-Temperatura do fundido	323,64	1	323,64	3,88	0,1878	
C-Temperatura de extração	389,27	1	389,27	4,66	0,1635	
D-Velocidade de Injeção	314,00	1	314,00	3,76	0,1921	
E-2º pressão	99,30	1	99,30	1,19	0,3894	
AB	0,8742	1	0,8742	0,0105	0,9278	
AC	98,70	1	98,70	1,18	0,3905	
AD	22,71	1	22,71	0,2719	0,6541	
BC	107,54	1	107,54	1,29	0,3742	
BD	1,12	1	1,12	0,0135	0,9183	
CD	27,67	1	27,67	0,3313	0,6230	
CE	13,80	1	13,80	0,1653	0,7237	
DE	72,34	1	72,34	0,8662	0,4503	
Residual	167,02	2	83,51			
Cor Total	1641,93	15				

5.3.4 Análise e Controlo de chupados

A análise de chupados teve de ser efetuada a nível visual, pois, não existia equipamento capaz de medir a profundidade de chupados tão ligeiros. Observaram-se as peças e foram classificadas como: sem chupados, com chupados ligeiros e com chupados acentuados, e colocaram-se os resultados na Tabela 15.

Tabela 15-Análise do aparecimento de chupados em cada peça

Ensaio	Chupados	Características
3,9,11,12,13,14 e15	Sem chupados	Praticamente todos os ensaios (exceto 14) contêm velocidade de injeção de 20%
1,2,4,6,7 e 8	Chupados ligeiros	Todos os ensaios ocorrem com uma temperatura de molde de 40°C.
10 e 16	Chupados bastantes acentuados	Ambos com temperatura do molde a 70°C, com velocidade de injeção a 99 % e com 2ª pressão a 25 bar.

A maior parte das peças não apresentam chupados, algumas apresentaram chupados ligeiros mas visíveis, e as peças provenientes dos ensaios 10 e 16 exibiram chupados bastante profundos. Ambos os ensaios (cujas as peças apresentam chupados profundos), foram realizados com uma temperatura de molde de 70°C, velocidade de injeção de 99 % e 2ª Pressão de 25 bar.

Como já mencionado anteriormente, quando a velocidade de injeção é elevada e o material é forçado muito rapidamente para o interior da cavidade, entrando em contacto com as paredes frias do molde, solidificando e impedindo a entrada de mais material, não conseguindo compensar contrações que ocorram durante a fase de arrefecimento. Para além disso, a 2ª Pressão é insuficiente para conseguir compensar essas mesmas contrações, o que só agrava a profundidade dos chupados.

O facto de a temperatura do molde ser a mais elevada, pode beneficiar a qualidade das peças provenientes do processo, uma vez que se esta for mais alta, existe margem para se poder diminuir a velocidade de injeção sem que a frente do fluxo solidifique antes de preencher a cavidade na totalidade.

Após a análise visual, mediu-se a profundidade dos chupados mais acentuados na máquina de metrologia, para poder ter uma noção da influência de algumas variáveis nas profundidades destes defeitos.

Segundo a Tabela 16 e a Figura 78, nas peças 10 (acima) e 16 (a baixo), os chupados são bastantes evidentes na zona preenchida pelo ataque de menor contribuição para o enchimento. Estes defeitos podem derivar do facto de o ataque de menor contribuição ter um menor diâmetro, comparativamente ao ataque de maior contribuição para o enchimento. Tendo menor diâmetro, entra uma menor quantidade de material para a cavidade, logo pode não conseguir compensar as contrações volumétricas que ocorram ao longo do processo.



Figura 78-Chupados das peças dos ensaios 10 e 16

Tabela 16- Medição da profundidade dos chupados mais acentuados

Ensaio	Profundidade dos chupados
10	0,327 mm
16	0,307 mm

5.3.5 Cor e Acabamento

Na análise visual, avaliou-se também a cor e o acabamento da peça, para averiguar a existência de zonas baças, cores diferentes, queimados, entre outros.

Apenas se verificaram ligeiros queimados nas extremidades nas duas peças correspondentes ao ensaio 7 e 15, Figura 79. Ambos os ensaios foram realizados com temperatura de fundido a 240 °C, temperatura de extração a 85°C e velocidade de injeção a 20 %.



Figura 79- Queimados das peças dos ensaios 7 e 15

5.4 Confirmação

Para concluir se os resultados foram interpretados de forma correta, efetua-se a confirmação dos mesmos. Dividiram-se as tabelas de confirmação consoante as características que se avaliaram anteriormente, sendo estas:

- Empenos
- Peso
- Tempo de Ciclo
- Chupados

Nas tabelas abaixo são descritos os efeitos dos fatores responsáveis pelas variações das características em estudo. Posteriormente, inseriram-se os ensaios (com os valores dos fatores considerados determinantes) que apresentam o valor mínimo e máximo da característica em estudo, e avaliou-se se estes resultados confirmam ou não o efeito descrito.

5.4.1 Simulações

- **Empenos**

Na Tabela 17, são confirmadas todas as conclusões retiradas das interpretações dos gráficos de variação do empeno nas simulações.

Os efeitos da variação dos empenos com a temperatura do molde e 2ª Pressão, a peça com empeno mínimo apresenta 70 °C de temperatura de molde e 25 bar de 2ª pressão, a peça de maior empeno foi simulada com 40°C de temperatura do molde e a 2ª Pressão de 90 bar.

Também se confirmou os efeitos relativos à interação entre 2ª pressão e temperatura do fundido, em que com o valor mínimo de 2ª Pressão (25 bar), o empeno aumentou com o aumento da temperatura do fundido e no caso em que se simulou com o maior valor de 2ª Pressão, a característica em estudo diminuiu com o aumento da temperatura.

Tabela 17- Tabela de Confirmação da Variação dos Empenos nas Simulações

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Empeno ↓ com ↑ da Temperatura do Molde	16 Empeno = 0,931mm	Temperatura do Molde= 70°C	8 Empeno =3,636mm	Temperatura do Molde= 40°C
Empeno ↑ com ↑ 2ª Pressão	16 Empeno = 0,931mm	2ª Pressão =25 bar	8 Empeno =3,636mm	2ª Pressão =90 bar
2ª Pressão = 90 bar empeno ↑ com ↑ da Temperatura do Fundido	2 Empeno = 2,184	Temperatura do Fundido =220°C	8 Empeno = 3,636mm	Temperatura do Fundido =240°C
2ª Pressão =25 bar empeno ↓ com ↑ da Temperatura do Fundido	16 Empeno = 0,931mm	Temperatura do Fundido =240°C	4 Empeno =2,234 mm	Temperatura do Fundido =220°C

- **Peso**

A Tabela 18 confirma as conclusões retiradas acerca da influência da velocidade de injeção na variação do peso das peças. De entre todas as 16 peças simuladas, a peça com menor peso foi simulada com a velocidade de injeção máxima, enquanto a peça mais densa foi simulada com a menor velocidade.

Tabela 18- Tabela e Confirmação da Variação do Peso nas Simulações

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Peso ↓ com ↑ da Velocidade de Injeção	14 Peso =249,892 gramas	Velocidade de Injeção= 99%	3 Peso= 256,89 gramas	Velocidade de Injeção= 20%

- **Tempo de Ciclo**

Neste caso, os processos com menor tempo de ciclo foram simulados com a velocidade máxima do intervalo, e os ensaios com tempos de ciclos mais longos foram injetados com menor velocidade, o que também confirma o efeito descrito anteriormente na análise dos gráficos.

Tabela 19- Tabela de Confirmação Da variação de tempo de Ciclo nas Simulações

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Tempo de ciclo ↓ com ↑ da Velocidade de Injeção	2,4,6,8,10,12,14 e16 Tempo de ciclo =39,112 segundos	Velocidade de Injeção= 99%	1,3,5,7,9,11,13 e 15 Tempo de Ciclo = 42,201 segundos	Velocidade de Injeção= 20%

- **Chupados**

Por fim, a Tabela 20, também a confirma o efeito da 2ª Pressão na variação dos chupados, uma vez que os ensaios com chupados menores contêm maior 2ª Pressão (90 bar), e como esperado, os ensaios com chupados mais profundos foram simulados com 2ª pressão de 25 bar.

Tabela 20- Tabela de Confirmação da variação de Chupados nas simulações

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Profundidade dos Chupados ↓ com ↑ da 2ª Pressão	8 e 9 Chupados =0,011mm	2ª Pressão= 90 bar	4 e 10 Chupados= 0,035mm	2ª Pressão= 25 bar

Processo ideal

Segundo as simulações, o "processo ideal" engloba 70°C de temperatura do molde, 240°C de temperatura de fundido, 90 bar de 2ª Pressão e velocidade de injeção de 20%. Nesta situação as variações dos intervalos de temperatura de extração e de temperatura do molde não evidenciam grande importância nos aspectos avaliados nas simulações. Porém com este processo, na prática as peças ficariam mais densas (cerca de 270 a 285 gramas) e o tempo de ciclo rondaria os 45 segundos.

5.4.2 Testes Experimentais

- **Empeno**

O efeito concluído anteriormente, da temperatura de extração na variação de empenos, também é confirmado na Tabela 21, uma vez que a peça com menor valor de empeno foi moldada com 65°C de temperatura de extração e a peça com maior empeno foi injetada com 85°C.

Tabela 21- Tabela de Confirmação da variação de Empeno nos testes Experimentais

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Empeno ↑ com ↑ da Temperatura de Extração	5 Empeno = 1,768mm	Temperatura de extração = 65°C	11 Empeno =5,327	Temperatura de extração = 85°C

Chupados

A Tabela 22, também confirma o efeito anteriormente descrito, pois a peça isenta de chupados foi moldada com a maior velocidade de injeção e as peças com chupados mais profundos foram injetadas com a menor velocidade.

Tabela 22-Tabela de Confirmação de chupados nos testes experimentais

Efeito	Ensaio com característica Mínima	Valor do fator	Ensaio com Característica Máximo	Valor do fator
Chupados ↓com ↑ da Velocidade de Injeção	3 (sem chupados)	Velocidade de Injeção = 90bar	10 e 16 Chupado=0,327mm	Velocidade de Injeção= 25 bar

Processo ideal

No caso dos testes experimentais, apenas se pode concluir que o "processo ideal" deve incluir uma temperatura de extração de 65°C, e o menor valor de velocidade de injeção, uma vez que não se retiraram mais conclusões significativas. Porém, devido ao facto de terem surgido queimados nas peças 7 e 15 (Figura 79- Queimados das peças dos ensaios 7 e 15), percebe-se que a temperatura do fundido não deve alcançar os 240°C, pois a esta temperatura o material pode degradar.

5.5 Comparações de resultados

Como já era expectável os resultados das simulações e dos testes experimentais foram um pouco díspares, e ambos são observáveis na Tabela 23. Relativamente aos empenos, as simulações demonstraram que a temperatura do molde, a 2ª pressão e a interação desta com a temperatura de fundido apresentam forte influência no aparecimento deste defeito, enquanto nos ensaios efetuados experimentalmente apenas a temperatura de extração mostrou ter influência na variação dos empenos. Além do mais, os empenos apresentados nas peças das simulações são menores que os das peças dos testes experimentais.

Em relação ao peso e tempo de ciclo, enquanto nos testes experimentais não se conseguiu chegar a uma conclusão concreta, no caso das simulações o fator determinante na oscilação de massa volúmica e do tempo de ciclo é a velocidade de injeção. Para além disso, nas simulações as peças apresentam (de uma forma geral) menor massa volúmica relativamente às peças obtidas por testes experimentais. Por fim, relativamente aos chupados, nas simulações a 2ª pressão é o fator determinante na variação destes, mas nos testes experimentais, os fatores com influência são a velocidade de injeção e a 2ª Pressão.

Tabela 23- Tabela de Comparação entre resultados das Simulações e testes Experimentais

Características	Fator(es) determinante(s) nas Simulações	Fator(es) determinante(s) nos Testes Experimentais
Empenos	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura do Molde <ul style="list-style-type: none"> • 2ª Pressão • Interação 2ª Pressão com Temperatura de fundido 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de Extração
Peso	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de Injeção 	Nenhum fator apresenta influência
Tempo de Ciclo	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de Injeção 	Nenhum fator apresenta influência
Chupados	<ul style="list-style-type: none"> • 2ª Pressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de Injeção • 2ª Pressão

Contudo, os "processos ideais" das simulações e dos testes experimentais podem ser de certa forma combinados. Em ambas as situações, ficou evidente que a velocidade de injeção mais indicada seria a de 20 %. Nas simulações concluiu-se que a temperatura do molde mais apropriada é de 70°C, a temperatura de fundido de 240°C e a 2ª pressão de 90 bar. Dos testes experimentais retira-se que a temperatura de extração ideal é de 65°C. Assim, com este conjunto de valores pode construir-se a "base" de um processo robusto. Tendo em consideração que nos testes experimentais as peças apresentaram alguns queimados, seria necessário adaptar a temperatura de fundido para um valor superior a 220°C, mas inferior a 240°C. Para além disso, segundo o estudo reológico a velocidade ideal estaria na casa dos 70

%, então opta-se por este valor para que o tempo de ciclo também possa ser reduzido. Por fim também na janela de processo se obteve um valor ideal para a 2ª Pressão, então optou-se por colocar o valor de 75 a 77 bar, pois este mostra ser suficiente para que não apareçam chupados e para não levar a máquina ao limite.

Combinando os resultados das simulações e dos testes experimentais, construiu-se a Tabela 24.

Tabela 24- Tabela de processo ideal

Processo ideal	
Temperatura do molde	70°C
Temperatura do fundido	230 a 238°C
Temperatura de extração	65°C
Velocidade de injeção	70 %
2ª Pressão	77 bar

6. CONCLUSÕES

A elaboração desta dissertação permitiu consolidar e aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo dos 5 anos de estudo, assim, como retratar a experiência e aprendizagem obtida no estágio curricular na empresa. Com base na investigação, espera-se ter cumprido todos os objetivos propostos e obter resultados relevantes e coerentes.

A peça em estudo mostrou ser um desafio desde o início, uma vez que existem muitos aspetos a ter em conta, como o acabamento superficial perfeito sem chupados, queimados ou outros defeitos visuais; a necessidade de os empenos serem mínimos e dos engates não partirem, surgirem com rebarba, entre outros fatores. Visto que existem outros produtos dependentes deste, é estritamente necessário que o processo esteja estabilizado e seja reproduzível. Porém o molde também é uma fração importante, daí ter existido a necessidade de se efetuarem várias alterações ao mesmo de forma a evitar danos visíveis no produto final, e atingir a robustez desejada. Uma máquina de injeção adequada para as dimensões do molde e com as especificações adequadas ao processo também é um aspeto fundamental para o alcance de um processo robusto.

As simulações em Moldex foram fundamentais para ser possível retirar conclusões acerca da influência dos fatores na variação das características analisadas, pois auxiliaram na obtenção de conclusões que não foram possíveis a partir dos testes experimentais.

As discrepâncias entre os resultados experimentais e dos obtidos pelas simulações, podem estar relacionadas com a circunstância de o modelo da máquina de injeção utilizada nas simulações não ser exatamente igual à da realidade (uma vez que não existia o modelo no programa Moldex), com o facto de terem existido erros na execução dos ensaios (embora estes tenham sido alvo de repetições), e com desvios de processo que se encontrem fora do alcance humano.

Contudo, de uma forma geral, os fatores determinantes tanto das simulações como das experiências, seguiram a teoria do *Scientific Injection Moulding*, onde ciência é a base para a obtenção de um processo robusto e reproduzível.

Atualmente, o mercado ambiciona produtos facilmente reproduzíveis em massa, de forma rápida e com qualidade e a aplicação do SIM permite alcançar isso mesmo.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] CS Plastic, “CS Plastic,” 2019. <https://www.csplastic.pt/> (accessed Oct. 28, 2020).
- [2] A. M. B. Amaldo Matos, António S. Pouzada, Eduardo S. Ferreira, Rui Soares, Honório Campante, António J. Pontes, “Manual do Projetista,” p. 78.
- [3] P. Carlos and Y. Suzuki, “Departamento de Engenharia de Transportes,” *Dados*.
- [4] Hamilton Nunes da Costa, “MOLDAGEM, CICLO E ETAPAS DE MOLDAGEM.” <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/moldagem-ciclo-e-etapas-de-moldagem/> (accessed Jan. 27, 2021).
- [5] J. Vlachopoulos and D. Strutt, “Polymer processing,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 9, pp. 1161–1169, 2003, doi: 10.1179/026708303225004738.
- [6] S. Kulkarni, *Robust process development and scientific Moulding: Theory and practice*. 2010.
- [7] F. M. N. Teixeira, “Moldação científica – Estudo da otimização de processos de injeção,” 2017.
- [8] Biomerics, “What is Scientific Injection Moulding?” <https://biomerics.com/scientific-injection-Moulding/> (accessed Sep. 16, 2020).
- [9] and Y. C. L. G.A. BRITTON, Y.-M.DENG, “Adopting ‘Scientific Moulding’ Methodology in a Simulation- Based Approach to Optimize Injection Fill Time,” *J. Inject. MOULDING TECHNOLOGY*, vol. 6, no. 4.
- [10] P. T. Programs, “WHAT IS SCIENTIFIC MOULDING?” <https://www.paulsontraining.com/what-is-scientific-Moulding/> (accessed Feb. 17, 2021).
- [11] EVCO Plastics, “SCIENTIFIC INJECTION MOULDING.” <https://www.evcoplastics.com/services/design-for-manufacturability/scientific-injection-Moulding> (accessed Feb. 16, 2021).
- [12] P. Technology, “Improving Moulding Process Capability: The Role of the Five Essential Pillars, Part 2,” 2018. <https://www.ptonline.com/articles/improving-Moulding-process-capability-the-role-of-the-five-essential-pillars-part-2> (accessed Feb. 23, 2021).
- [13] F. TECH, “THE FIVE PILLARS AND THE THREE CONSISTENCIES.”

- <http://fimmtech.com/knowledgebase/the-5-pillars-and-3-consistencies/> (accessed Feb. 24, 2021).
- [14] A. S. P. da Costa, “Otimização de um projeto de molde de elevada precisão e elevado ‘ output ’ (caso real),” 2019.
- [15] K. Glassen, “Scientific Moulding: 6 Essential Steps for Success [INFOGRAPHIC].” <https://www.kaysun.com/blog/scientific-Moulding-steps>.
- [16] M. C. Cramez, “DOE.” Departamento de Engenharia de Polímeros, p. 21.
- [17] C. Martins, “Mestrado em Engenharia Polímeros Comportamento e Qualidade Materiais Plásticos Comportamento e Qualidade Materiais Plásticos PROGRAMA Comportamento e Qualidade Materiais Plásticos Ferramentas da qualidade Comportamento e Qualidade Materiais Plásticos Exem,” pp. 1–33.
- [18] C. Chen, M. Chuang, Y. Hsiao, Y. Yang, and C. Tsai, “Expert Systems with Applications Simulation and experimental study in determining injection Moulding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 7, pp. 10752–10759, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.02.017.
- [19] Quality-One, “DOE.” <https://quality-one.com/doe/>.
- [20] P. M. M. e Castro, “MÉTODO DE TAGUCHI: CONTROLO DE QUALIDADE COM RECURSO NÃO CONVENCIONAL AO DESENHO ESTATÍSTICO DE EXPERIÊNCIAS (DOE),” *Inst. Port. Adm. e Mark. (IPAM)- Lisboa*, p. 16.
- [21] “Teaching the Taguchi method to industrial engineers, Work Study _ 10.”
- [22] C. S. S. Pinto, “Core back moulding, adhesion optimization in the joining area,” 2020.
- [23] Simulflow, “Moldex 3D MOLDIG INOVATION.” <https://www.simulflow.pt/produtos/moldex-3d/>.
- [24] “Design Expert.” Minneapolis, 2021, [Online]. Available: <https://www.statease.com/software/design-expert/>.
- [25] S. L. Silva, F. A. Forcellini, and R. K. Scalice, “SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS,” *REVISTA FERRAMENTAL*. <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/sistemas-de-refrigeracao-para-moldes-de-injecao-de-termoplasticos/>.
- [26] F. TECH, “THE 6-STEP STUDY.” <http://fimmtech.com/knowledgebase/scientific-Moulding-the-6-step-study/>(accessed Feb. 16, 2021).

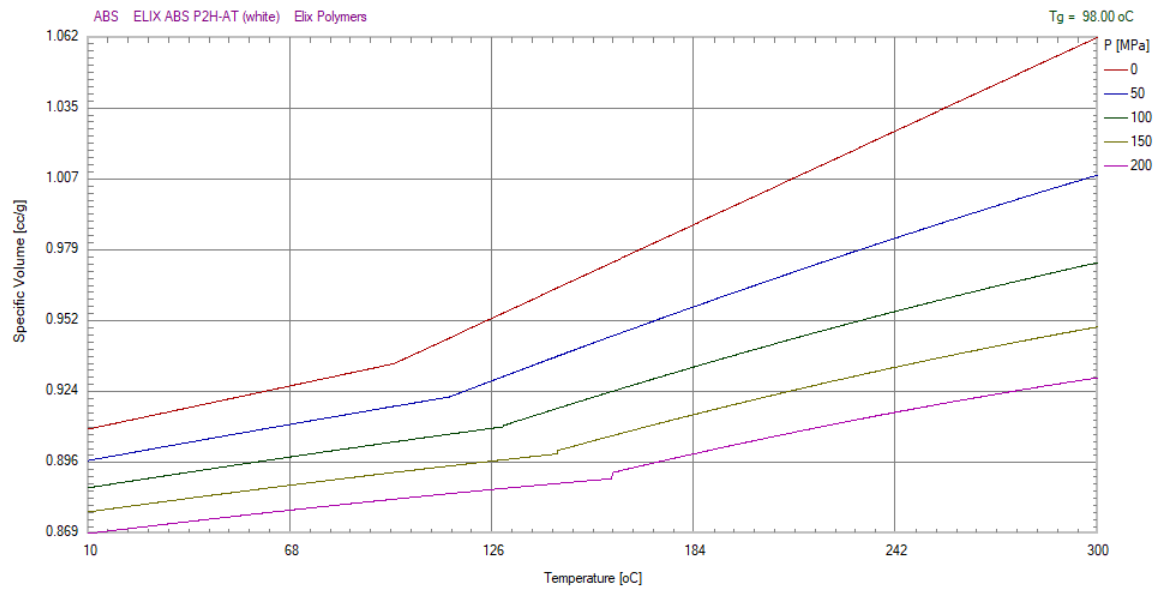
8. ANEXO I- FICHA TÉCNICA

Elix ABS P2H-AT

standard impact strength, easy flowing, high gloss, contains antistatic additive

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Rheological properties				
Molding shrinkage, normal	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.6
Melt volume-flow rate	220 °C; 10 kg	cm ³ (10 min)	ISO 1133	37
Molding shrinkage, parallel	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.6
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	44
Tensile Strain at break	50 mm/min	%	acc. ISO 527-1,-2	>15
Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2500
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	70
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2400
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	16
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	7
Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.1
Tensile creep modulus	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
Tensile creep modulus	1000 h	MPa	ISO 899-1	1500
Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	100
Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	80
Charpy notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	16
Charpy notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	7
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	110
Thermal properties				
Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	93
Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	97
Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	98
Burning behavior UL 94 (1.6 mm) [UL listed]	1.6 mm	Class	UL 94	HB
Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁶ /K	ISO 11359-1,-2	0.9
Burning rate (US-FMVSS)	2.0 mm	mm/min	ISO 3795	60
Glow wire test (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	700
Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)				
Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.0
Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	2.9
Dissipation factor	100 Hz	10 ⁻⁴	IEC 60250	55
Dissipation factor	1 MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	90
Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E13
Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E15
Electric strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	34
Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	600
Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Other properties (23 °C)				
Density		g/cm ³	ISO 1183	1.050
Processing conditions for test specimens				
Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	240
Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	70
Injection molding-Injection velocity		mm/s	ISO 294	240

ANEXO 2- CURVA PVT DE ABS ELIX P2H-AT



ANEXO

3-

HAIJINJ

HF

3600

