

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Moldação científica – Estudo da otimização de processos de injeção

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do/da/de

Professor Doutor Júlio César Machado Viana

Engenheiro Hélder Filipe Pereira de Pinho

Outubro de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Filipe Manuel Neto Teixeira

Endereço eletrónico: filipenetoteixeira@gmail.com Telefone: 913875318

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14145531

Título da dissertação: Moldação cientifica – Estudo da otimização de processos de injeção

Orientadores:

Professor Júlio César Machado Viana

Engenheiro Hélder Filipe Pereira de Pinho

Ano de conclusão: 2017

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, _____/_____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar esta oportunidade para agradecer a todos aqueles que contribuíram para que este projeto fosse um sucesso, a eles, um muito obrigado!

Em primeiro lugar, gostaria de citar a Prettl Adion Portuguesa que; à semelhança do que aconteceu no meu estágio curricular, disponibilizou todos os meios necessários para a conclusão da minha dissertação. A todos os funcionários que sempre se mostraram recetivos a incluir-me no dia a dia da empresa e que sempre me ajudaram com qualquer dificuldade encontrada. Todo o conhecimento e experiência que adquiri neste período, será fulcral para o meu futuro profissional.

Um agradecimento especial ao meu orientador na empresa, Hélder Pinho, que desde cedo mostrou interesse no meu trabalho e provou ser uma ajuda indispensável para a conclusão dos objetivos a que me propus.

Agradecer também ao meu orientador na universidade, o Professor Júlio Viana, que sempre se mostrou disponível a participar ativamente no meu projeto. O conhecimento que partilhou comigo será uma mais valia para os desafios que irei enfrentar.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha família que, como em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiou incondicionalmente e incentivou-me a perseguir os meus objetivos.

RESUMO

Esta dissertação surge no seguimento da conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. A mesma foi realizada na empresa Prettl Adion Portuguesa, com o objetivo de fazer um estudo dedicado à otimização de processos de moldação por injeção, baseados em princípios científicos. Este estudo procura assim oferecer robustez e consistência ao processo produtivo.
Numa fase inicial, procedeu-se à discussão da metodologia a adotar para o estudo, assim como, a identificação dos produtos que seriam alvo de análise. A escolha dos produtos deveu-se ao fato de que os mesmos não apresentavam processos produtivos estáveis e com aparecimento frequente de defeitos ao nível do processamento.
Após a estruturação das tarefas a realizar, foram efetuados vários ensaios dedicados à otimização de processos de injeção. Isto permitiu desenvolver uma sensibilidade acrescida quanto às variáveis ou inputs de processamento, assim como a sua influência, no processo de injeção.
Os casos identificados inicialmente foram submetidos à metodologia previamente definida que permitiu obter uma série de dados e informações importantes quanto às variáveis ótimas para a obtenção de um processo robusto e estável.
Em seguida, foi então encontrado o conjunto de variáveis a introduzir na máquina de moldação por injeção, para cada caso estudado. No final, os processos produtivos apresentaram melhores resultados, com tempos de ciclo mais reduzidos e peças ausentes de defeitos.

Palavras-Chave: Otimização, Injeção, Robustez, Estável, Consistência.

ABSTRACT

This dissertation comes to conclude the integrated masters in polymer engineering of the university of Minho. It was carried out at the company Prettl Adion Portuguesa with the purpose of doing a study dedicated to the optimization of injection moulding processes, based on scientific principles. This study seeks to offer robustness and consistency to the production process.

In an initial phase, the methodology to be adopted was discussed, as well as the identification of the products that would be analysed. The choice of products was since they did not present stable production processes and with frequent appearance of defects at the processing level.

After the structuring of the tasks to be performed, several tests were carried out dedicated to the optimization of injection processes. This allowed to develop an increased sensibility regarding the variables or processing inputs, and their influence, in the injection process.

The cases identified initially were submitted to a defined methodology that provided a series of data and important information regarding the optimal variables to obtain a robust and stable process.

Then, the set of variables to be introduced in the injection moulding machine was found for each case studied. Thus, the productive processes presented better results, with shorter cycle times and parts absent of defects.

Keywords: Optimization, Injection, Robustness, Stable, Consistency

ÍNDICE

Agradecimentos iii
Resumo v
Abstract vii
Índice ix
Lista de Figuras xiii
Lista de Tabelas xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos xix
1. Introdução 1
1.1 Enquadramento e Motivação 1
1.2 A empresa – Think global act local 2
1.3 Organização da dissertação 3
2. Revisão Bibliográfica 5
2.1 Moldação por injeção 5
2.1.1 Introdução ao processo de moldação por injeção 5
2.1.2 A máquina de injeção 6
2.1.3 Ciclo de moldação por injeção 7
2.2 Introdução ao processo cientifico de moldação por injeção 9
2.2.1 A evolução do processo de moldação por injeção 9
2.2.2 O processo de injeção 10
2.2.3 Os tipos de consistência necessárias na moldação por injeção 10
2.2.4 Processo de moldação cientifico 12
2.2.5 Fatores críticos do processo de moldação por injeção 13
2.3 Introdução aos polímeros 15
2.3.1 Enquadramento histórico 16
2.3.2 Classificação dos materiais poliméricos 17
2.4 Morfologia dos polímeros 18
2.5 Importância da morfologia dos polímeros na moldação por injeção 19

2.5.1 Diferença na contração entre os polímeros amorfos e semi-cristalinos 19
2.5.2 Janela de temperatura de processamento 19
2.5.3 Velocidade de injeção 20
2.5.4 Temperatura do molde 20
2.5.5 Perfil de temperaturas no cilindro de injeção 21
2.5.6 Velocidade de rotação do fuso 22
2.5.7 Controlo de temperatura no bico de injeção 22
2.5.8 Tempo de arrefecimento 22
2.6 Reologia dos polímeros 23
2.6.1 Introdução à reologia 23
2.6.2 Comportamento viscoelástico 23
2.6.3 A reologia na moldação por injeção 23
2.7 Armazenamento e desumidificação da matéria-prima 24
2.8 Capabilidade 25
3. Processo Experimental 27
3.1 Os 6 passos para o estudo da otimização do processo 27
3.1.1 Etapa 1: Otimização da fase de injeção – Estudo reológico 27
3.1.2 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades 30
3.1.3 Etapa 3: Estudo da queda de pressão 31
3.1.4 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação 32
3.1.5 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento 33
3.1.6 Etapa 6: Validação da almofada 34
4. Casos de Estudo 37
4.1 Caso 1: Lente transparente 37
4.2 Caso 2: Guia de luz 39
4.3 Caso 3: Suporte 41
5. Apresentação e Discussão dos Resultados Obtidos 43
5.1 Caso 1: Lente transparente 43
5.1.1 Características a controlar na lente transparente 44
5.1.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção – Estudo Reológico 46

5.1.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades 47
5.1.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão 49
5.1.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação 50
5.1.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento 51
5.1.7 Etapa 6: Validação da almofada 53
5.1.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 1 54
5.2 Caso 2: Guia de luz 56
5.2.1 Características a controlar no guia de luz 56
5.2.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção 58
5.2.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades 61
5.2.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão 62
5.2.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação 63
5.2.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento 64
5.2.7 Etapa 6: Validação da almofada 65
5.2.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 2 66
5.3 Caso 3: Suporte 67
5.3.1 Características a controlar no suporte 68
5.3.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção 69
5.3.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades 71
5.3.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão 72
5.3.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação 73
5.3.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento 74
5.3.7 Etapa 6: Validação da almofada 75
5.3.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 3 76
6. Conclusões gerais e trabalhos futuros 79
6.1 Conclusões 79
6.2 Trabalhos Futuros 80
7. Referências 81
Anexo I – Ficha Técnica do PMMA PLEXIGLAS 8N 83
Anexo II – Ficha Técnica do ABS Novodur HH-112 85
Anexo iii – Estudo de capabilidade para o suporte direito (Caso de estudo 3) 87

Anexo IV – Estudo de capabilidade para o suporte esquerdo (Caso de estudo 3)..... 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Prettl Adion Portuguesa 2
Figura 2: Esquema representativo de uma máquina de moldação por injeção (8) 6
Figura 3: Diferentes fases do ciclo de injeção (1) 8
Figura 4: Consistência de cavidade para cavidade (2) 11
Figura 5: Consistência de injeção para injeção (2) 11
Figura 6: Consistência de processo para processo (2) 12
Figura 7: Os cinco fatores que influenciam a qualidade das peças (2) 13
Figura 8: O processo de polimerização e formação do polietileno (3) 15
Figura 9: Classificação dos materiais poliméricos 17
Figura 10: a) Polímero amorfo (4), b) Polímero semi-cristalino (5) 18
Figura 11: Transições térmicas e intervalos de temperaturas de processamento para materiais amorfos e semi-cristalinos (3) 20
Figura 12: Perfil de temperaturas no cilindro para materiais amorfos e semi-cristalinos (2) 21
Figura 13: Diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa-efeito (6) 25
Figura 14: Viscosidade do PBT representada numa escala linear (2) 27
Figura 15: Orientação das moléculas na direção do fluxo segundo diferentes velocidades de injeção (2) 28
Figura 16: Lente transparente 38
Figura 17: Zhafir ZE 1500 38
Figura 18: a) Parte fixa do molde da lente transparente, b) Parte móvel do molde da lente transparente 38
Figura 19: a) Guia de luz esquerdo, b) Guia de luz direito 40
Figura 20: Engel ES 200/50 HL 40
Figura 21: a) Parte fixa do molde do guia de luz, b) Parte móvel do molde do guia de luz 40
Figura 22: a) Suporte esquerdo, b) Suporte direito 42
Figura 23: Engel ES 650/125 HL 42
Figura 24: a) Parte fixa do molde do suporte, b) Parte móvel do molde do suporte 42
Figura25: Lente transparente 43
Figura26: Suporte pequeno 43

Figura27: Pisca pequeno 43
Figura28: Suporte largo 43
Figura29: Pisca largo 43
Figura30: Representação da dimensão crítica (D1) a controlar para a lente transparente (Vista lateral) 45
Figura 31: Curva da viscosidade para a lente transparente 47
Figura 32: Estudo de balanceamento de cavidades para a lente transparente 48
Figura 33: Estudo da queda de pressão para a lente transparente 50
Figura 34: Estudo do tempo de compactação para a lente transparente 51
Figura 35: Estudo do tempo de arrefecimento para o lente transparente 52
Figura 36: Estudo da variação da almofada para a lente transparente 54
Figura37: Representação do guia de luz com indicação do ponto de injeção 56
Figura 38: Biómetro utilizado num dos testes funcionais do guia de luz 58
Figura 39: Calibre utilizado num dos testes funcionais do guia de luz 58
Figura 40: Curva da viscosidade para o guia de luz 60
Figura 41: Estudo de balanceamento de cavidades para o guia de luz 61
Figura 42: Estudo da queda de pressão para o guia de luz 62
Figura 43: Estudo do tempo de compactação para o guia de luz 63
Figura 44: Calibre usado para a etapa 5 do guia de luz 64
Figura 45: Estudo da variação da almofada para o guia de luz 65
Figura 46: Suporte esquerdo 67
Figura 47: Suporte direito 67
Figura 48: Guia de luz esquerdo 67
Figura 49: Guia de luz direito 67
Figura 50: Cover esquerdo 67
Figura 51: Cover direito 67
Figura 52: Lente esquerda 67
Figura 53: Lente direita 67
Figura 54: Montagem final esquerda 67
Figura 55: Montagem final direita 67
Figura 56: Calibres usados para a medição de D2 69
Figura 57: Curva da viscosidade para o suporte 70

Figura 58: Estudo de balanceamento de cavidades para o suporte 71
Figura 59: Estudo da queda de pressão para o suporte 72
Figura 60: Estudo do tempo de compactação para o suporte 73
Figura 61: Estudo do tempo de arrefecimento para o suporte 75
Figura 62: Estudo da variação da almofada para o suporte 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caraterísticas gerais para o caso 1 37
Tabela 2: Características gerais para o caso..... 39
Tabela 3: Características gerais para o caso 3 41
Tabela 4: Representação dos componentes e a sua montagem no caso1 43
Tabela 5: Inspeção visual da lente transparente 44
Tabela 6: Controlo dimensional da lente transparente 45
Tabela 7: Testes funcionais da lente transparente 45
Tabela 8 Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para a lente transparente..... 46
Tabela 9: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 2 para a lente transparente..... 48
Tabela 10: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para a lente transparente .. 49
Tabela 11: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para a lente transparente..... 52
Tabela 12: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para a lente transparente..... 53
Tabela 13: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 1 55
Tabela 14: Inspeção visual do guia de luz 57
Tabela 15: Controlo dimensional do guia de luz 57
Tabela 16: Testes funcionais do guia de luz 57
Tabela 17: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para o guia de luz..... 59
Tabela 18: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 2 para o guia de luz..... 61
Tabela 19: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para o guia de luz 62
Tabela 20: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para o guia de luz..... 64
Tabela 21: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para o guia de luz..... 65
Tabela 22: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 2 66
Tabela 23: Representação dos componentes e da sua montagem posterior para o caso 3..... 67
Tabela 24: Inspeção visual do suporte 68
Tabela 25: Controlo dimensional do suporte 68
Tabela 26: Testes funcionais do suporte 68
Tabela 27: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para o suporte..... 69
Tabela 28: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 3 para o suporte..... 71
Tabela 29: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para o suporte 72

Tabela 30: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para o suporte 74
Tabela 31: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para o suporte 75
Tabela 32: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 3 77

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

PMMA- Polimetilmetacrilato

PCB- Printed circuit board (Placa com circuito impresso)

ABS- Acrilonitrilo-butadieno-estireno

DOE- Design of experiments (Plano de experiências)

PAP- Prettl Adion Portuguesa

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, e face às crescentes exigências do mercado, é imperativo que a indústria procure encontrar novas soluções para dar uma resposta mais rápida e mais eficaz aos desafios colocados diariamente pelos consumidores. O atual panorama económico conduz inevitavelmente as empresas à reformulação das suas estratégias face ao mercado em que atuam. Esta necessidade de adaptação tem como objetivo uma melhoria contínua de todo o processo produtivo, com foco nas necessidades e aspirações dos clientes.

Atendendo ao fato de que o processo de moldação por injeção é atualmente um dos principais métodos produtivos na produção de peças plásticas, torna-se imperativo que o mesmo seja devidamente analisado e compreendido. É então neste seguimento que surge o projeto descrito nesta dissertação: um estudo pormenorizado sobre todas as variantes do processo de injeção.

O entendimento deste processo ajuda a tomar melhores decisões aquando da definição inicial de todos os parâmetros envolvidos na moldação por injeção. Assim, ficaremos dotados para definir processos que sejam robustos e eficientes em termos produtivos.

Produtividade mais elevada, menos desperdício, inspeção de qualidade menos frequente, redução ao número de mudanças no processo e ausência da necessidade de intervenção humana, são alguns dos benefícios da aplicação de princípios científicos ao processo de moldação por injeção. Esta dissertação trata então disso mesmo, de atingir processos robustos e estáveis segundo uma metodologia baseada em princípios científicos.

A metodologia apresentada ao longo deste trabalho contém um conjunto de etapas sequenciais, em que cada uma das mesmas permite obter uma série de ilações quanto à moldação de um determinado produto. No entanto, as conclusões finais, após aplicação das etapas referidas, serão o conjunto de variáveis operatórias ótimas para o produto em questão. Assim, os parâmetros encontrados serão a base para a definição de processos de moldação por injeção robustos e estáveis.

1.1 Enquadramento e Motivação

O projeto descrito ao longo desta dissertação surge no âmbito da conclusão do ciclo de estudos do curso de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. O trabalho desenvolvido e implementado na Prettl Adion Portuguesa, assenta numa base de melhoria contínua que representa um esforço constante face às exigências atuais do mercado.

A intensificação da competitividade no setor empresarial obriga as empresas a procurar e adotar novas estratégias que lhes permitam responder às necessidades dos clientes. Assim, como foi dito anteriormente, a definição de processos produtivos robustos e eficientes apresenta-se como sendo fulcral para o incremento da produtividade na indústria.

Atendendo à importância desta questão, todos os esforços de melhoria da empresa concentram-se no processo produtivo e foi nesse sentido que este projeto se iniciou.

1.2 A empresa – *Think global act local*

O grupo PRETTL é um grupo internacional que engloba cerca de 30 empresas independentes e conta com mais de 5000 colaboradores por todo o mundo. O grupo está dividido em quatro ramos distintos: automóvel; eletrodomésticos; aplicações industriais e consumidores.

A Prettl Adion Portuguesa (PAP) está inserida no grupo PRETTL e está integrada na divisão *"Lighting and Interiors"* do setor automóvel. A empresa produz peças em plástico de iluminação (interna e externa) e decoração de interiores exclusivamente para o ramo automóvel.

A Prettl Adion Portuguesa nasceu em Arcos de Valdevez em outubro de 2004 com o intuito de prestar auxílio à Adion Alemanha, engobando uma serie de atividades tais como: seleção, retrabalho e montagem manual de componentes de modo a dar suporte ao cliente Blaupunkt (atualmente Bosch). Em 2006, a empresa mudou-se para Santo Tirso com o objetivo de realizar atividades de injeção de plásticos, tampografia, laser, soldadura e pintura. Atualmente, a Prettl Adion Portuguesa realiza processos de moldação de plásticos por injeção, montagens manuais e semiautomáticas e acabamentos de superfície (tampografia, laser, metalização, pintura, etc.).



Figura 1: Prettl Adion Portuguesa

1.3 Organização da dissertação

Numa primeira fase, serão apresentadas as bases teóricas desta dissertação, dando ênfase ao processo de moldação cientifico e o que este implica. Posteriormente será apresentada a metodologia utilizada para a realização do processo experimental, comtemplando uma descrição minuciosa de todas as etapas constituintes. Segue-se a apresentação dos produtos que foram alvo de estudo, das suas características mais relevantes e dos meios e equipamentos usados na concretização deste projeto. A etapa seguinte, e talvez a de maior importância, prende-se com a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Nesta etapa, será analisado todo o trabalho efetuado, etapa a etapa, contando com ilações concretas, baseadas nos resultados alcançados. Por último, serão apresentadas algumas conclusões gerais deste trabalho, refletindo sobre o que foi feito e o que se poderá fazer no futuro, no seguimento do tema discutido nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capitulo estão presentes as bases teóricas por detrás do trabalho desenvolvido ao longo deste período. Primeiramente será apresentada uma breve introdução ao processo de moldação por injeção, com referência aos constituintes principais da máquina de injeção e o ciclo correspondente a este processo. De seguida, será abordado o tema da moldação científica e como é que este se aplica ao processo de injeção. Será feita ainda referência aos polímeros, com especial destaque à sua morfologia, assim como a importância desta no processo de injeção. Neste capítulo está presente também uma alusão à reologia dos polímeros visto que se trata de uma disciplina crucial para o entendimento desta dissertação. Por último, será referido o processo de armazenamento e desumidificação da matéria-prima, assim como o estudo de capabilidade que foi realizado para a validação de um processo de injeção, relativo ao terceiro caso de estudo.

2.1 Moldação por injeção

2.1.1 Introdução ao processo de moldação por injeção

O processo de moldação por injeção e a extrusão encontram-se entre as técnicas mais comuns na manufatura de materiais plásticos. Em especial, a moldação por injeção, surgiu por intermédio dos irmãos Hyatt, com vista à produção de bolas de bilhar. Assim, em 1872, é criada e patenteada a primeira máquina de injeção. Embora sendo uma máquina primitiva, adequava-se perfeitamente ao seu propósito, esta continha um êmbolo básico que injetava o plástico num molde através de um cilindro aquecido. Desde então a injeção de materiais plásticos percorreu um longo caminho até ao processo que conhecemos atualmente. A simplicidade do conceito, a eficiência da produção e a possibilidade de obtermos peças complexas, são as principais razões para o sucesso desta técnica. Face às crescentes exigências do mercado, verificou-se uma evolução do processo de moldação por injeção no sentido de proporcionar uma resposta mais eficaz aos desafios colocados pelos consumidores.

Em termos práticos, a moldação por injeção pode ser definida como sendo um processo que consiste na transformação de material plástico, originalmente no estado sólido, numa peça com dimensões e características previamente estipuladas. A máquina é alimentada pelo material sólido, usualmente sob a forma de granulado, que é posteriormente aquecido com vista ao seu amolecimento e depois forçado,

sob pressão, para dentro de um molde. Já dentro do molde, o material fundido replica os contornos presentes no mesmo até que, eventualmente, arrefece e recupera a sua rigidez.

Esta tecnologia constitui um dos métodos mais importantes e mais rentáveis no mundo da transformação de plásticos. É, portanto, um processo com: um elevado volume de produção, assim como de enorme versatilidade em termos geométricos e dimensionais (as peças injetadas apresentam uma gama de massas, desde valores inferiores a uma grama até varias dezenas de quilogramas); e também, é um processo que permite obter excelentes acabamentos superficiais, garantindo também tolerâncias dimensionais rigorosas.

2.1.2 A máquina de injeção

Uma máquina de injeção possui quatro unidades funcionais (Figura2), são elas:

a) **Unidade de potência:** é responsável pelo fornecimento da quantidade de energia necessária para o funcionamento da máquina; pode ser caracterizada por um sistema de pressão eletromecânico, ou podem ser também baseadas em tecnologia óleo-hidráulica.

b) **Unidade de plasticização ou de injeção:** capaz de promover o transporte, aquecimento e homogeneização do material plástico, desde a parte inferior da tremonha até ao bico de injeção; encarregue também da injeção do material no molde e consequente pressurização do fundido.

c) **Unidade de fecho:** responsável pelo alojamento e movimentos característicos do molde; deve ainda ser capaz de manter o molde fechado, a alta pressão, nas fases de injeção e de pressurização; pode também englobar os mecanismos responsáveis pela extração das peças.

d) **Unidade de comando:** permite supervisionar todo processo de injeção, assim como inserir os *inputs* e as variáveis que caracterizam o todo o ciclo; caracteriza-se como sendo a interface entre o operador e os periféricos constituintes da máquina.

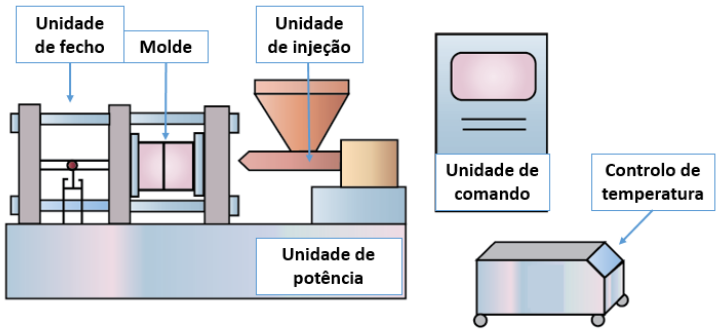


Figura 2: Esquema representativo de uma máquina de moldação por injeção *(8)*

2.1.3 Ciclo de moldação por injeção

O processo de injeção engloba um conjunto de etapas cíclicas que se repetem sempre ao fim da produção de uma moldação. A otimização deste ciclo é crucial no sentido de garantir a competitividade económica da empresa, visto que estes equipamentos são bastante dispendiosos e as exigências dos consumidores, crescentes. É então necessário interpretar corretamente cada variável que constitui este ciclo, pois essas deverão ser ajustadas de acordo com as propriedades do material (comportamento reológico e térmico), assim como as especificações do produto final. Passaremos então à análise do ciclo de moldação:

1) **Fase de fecho e de geração de força de fecho:** esta etapa representa o início de todo o ciclo, quer seja em regime automático ou semi-automático (processo pára ao fim da extração de uma moldação); relativamente à velocidade de fecho do molde, existem dois aspetos a ter em conta nesta fase: o encosto deve ser suave para evitar a danificação do molde e após isso ser garantido, poderá ser possível aumentar a velocidade no sentido de evitar desperdícios de tempo.
2) **Fase de injeção:** após o bico de injeção encostar no molde, o fuso presente no interior do cilindro, é empurrado para a frente (bloqueando uma válvula anti-retorno presente na extremidade do mesmo), o que obriga o material fundido a fluir para o interior do molde; a velocidade de injeção deverá ser cuidadosamente inserida na máquina, pois esta deverá corresponder a um compromisso entra a rapidez de enchimento da cavidade e a replicação correta dos contornos do molde.
3) **Fase de compactação:** posteriormente à fase de injeção, é necessário continuar a exercer pressão no fundido, a fim de diminuir o efeito da contração do material no molde (por arrefecimento) e evitar que o mesmo volte novamente para o cilindro; no entanto, tanto a pressão exercida como o tempo em que a mesma está a ser aplicada, não deve ser demasiado elevado para evitar danos posteriores na peça, assim como problemas na extração.
4) **Fase de arrefecimento:** após o enchimento total da moldação, o fuso começa o movimento de rotação (iniciando a plasticização de mais material), sendo assim obrigado a recuar sob o efeito da pressão causada pelo fundido no mesmo; paralelamente a este mecanismo, a moldação está a arrefecer no molde; assim que a plasticização esteja concluída (quando atinge o volume de dosagem pretendido), o movimento de rotação do fuso para e poderá ser sujeito a um movimento adicional de recuo linear (descompressão), no sentido de aliviar a pressão no material fundido; a etapa de arrefecimento termina quando a moldação atinge uma temperatura tal que permite a extração da mesma sem que causar danos; esta fase é basicamente um processo de

dissipação de calor que depende das dimensões da peça, por exemplo, uma peça com uma espessura superior, terá necessidade de um tempo de arrefecimento mais elevado; um tempo mais longo, possibilita também a redução das tensões internas acumuladas no material

5) **Fase de abertura e extração:** a abertura do molde ocorre assim que o tempo de arrefecimento chega ao fim e a velocidade e o curso de abertura devem ser selecionados tendo em conta as dimensões gerais do molde e da peça; é uma operação crítica a nível produtivo pois por vezes, sob a atuação de mecanismos apropriados, poderá ser necessário a separação do jito dos canais de alimentação.
6) **Tempo morto:** este tempo vai desde que a moldação está pronta a ser retirada do molde e o inicio de um novo ciclo; no caso em que a máquina se encontra em regime automático, este tempo é substancialmente curto, mas quando a remoção da peça é feita manualmente, este tempo já é mais elevado; a situação ideal passa, naturalmente, por tempos mortos reduzidos, aumentando assim a reprodutibilidade do processo.

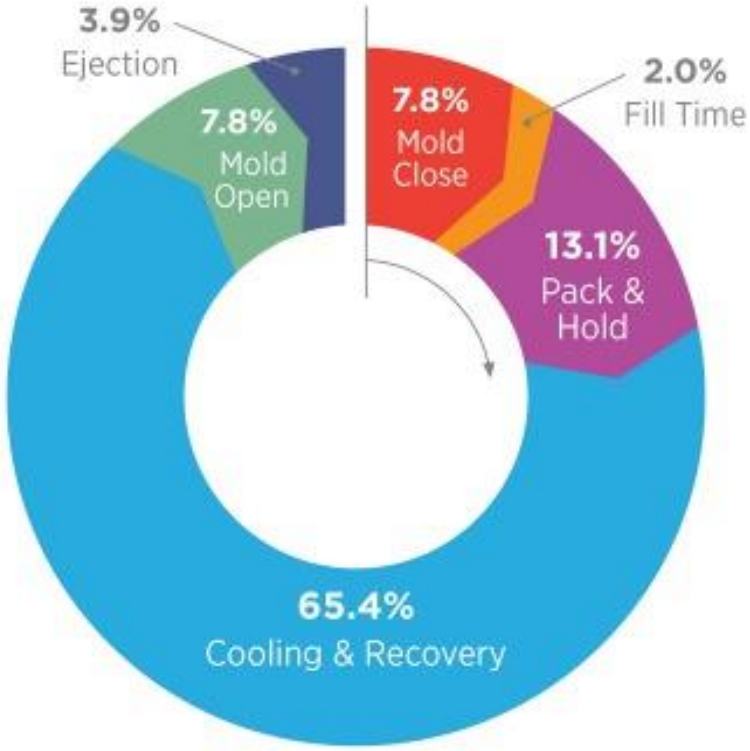


Figura 3: Diferentes fases do ciclo de injeção *(1)*

2.2 Introdução ao processo cientifico de moldação por injeção

O objetivo deste projeto, que se estende a qualquer empresa dedicada à injeção de plásticos, é o de obter um processo produtivo robusto e consistente. A aplicação de princípios científicos pressupõe a compreensão do efeito que cada variável tem no processo de moldação por injeção. Assim, o processamento cientifico engloba todas as etapas características de uma determinada produção, ou seja, desde que o material plástico entra na fábrica, até ao momento em que sai sob a forma de produto final. Um processo de injeção está naturalmente sujeito a variações naturais (variações na máquina ou no material são dois bons exemplos de possíveis alterações no processo) que podem comprometer a qualidade final do produto. Um processo robusto será capaz de manter a qualidade das peças produzidas, mesmo sendo passível de sofrer variações naturais no processo ou pequenas mudanças induzidas nas variáveis de processamento. Por exemplo, após alcançarmos uma determinada velocidade de injeção, a viscosidade do material irá manter-se constante, traduzindo-se num enchimento progressivo e uniforme ao longo do molde. No entanto, quando operamos com velocidades de injeção baixas, a mínima variação na velocidade irá provocar alterações significativas na viscosidade do material, ou seja, o enchimento do molde já não será uniforme. Neste caso, já não estamos a trabalhar na área robusta do processo pois este não será capaz de manter a consistência na qualidade das peças quando pequenas alterações são induzidas no processo.

Robustez e consistência não se traduz necessariamente em peças produzidas de acordo com as especificações do produto. É possível obtermos um processo robusto, com consistência na qualidade das peças, mas as mesmas não apresentam as especificações pretendidas.

2.2.1 A evolução do processo de moldação por injeção

A evolução do processo de moldação por injeção deve-se essencialmente à evolução da ciência e da tecnologia que resulta de uma necessidade de produzir produtos cada vez mais complexos. Nos dias de hoje, uma tolerância na ordem dos milésimos de milímetro é perfeitamente exequível. A necessidade de *designs* inovadores, especialmente concebidos para montagem e produtos injetados com diferentes materiais no mesmo molde (injeção multimaterial), é uma prática comum. Para além disso, à medida que os materiais poliméricos foram evoluindo, as exigências do processo também mudaram. A descoberta de diferentes morfologias nos materiais e a necessidade de uma melhor homogeneização do fundido levou à introdução de novos fusos de injeção concebidos para um material específico. A utilização de materiais que possuem temperaturas de processamento mais elevadas e necessitam de temperaturas

de molde igualmente altas, levou à necessidade de recorrer a placas de aquecimento em cerâmica e controladores de temperatura capazes de fornecer taxas de calor elevadas. Inovações na tecnologia elétrica e eletrónica facilitaram o controlo, precisão e eficiência das máquinas, aumentando também a popularidade das injetoras elétricas e híbridas.

Em síntese, a necessidade de eficiência e de produtos com características complexas ditou, por sua vez, a necessidade de inovação no processo de injeção no desenrolar dos anos. Processo esse que se encontra em evolução contínua. (2)

2.2.2 O processo de injeção

Atualmente, o processo de injeção é tradicionalmente definido pelos *inputs* na máquina de injeção, tais como, velocidades, pressões, temperaturas e tempos. Variáveis como a velocidade de injeção, pressão de injeção, temperatura de fundido ou o tempo de segunda pressão, são alguns dos exemplos de *inputs* introduzidos na máquina e registados na que é industrialmente designada por ficha de afinação. No entanto, a definição do processo deve ser redefinida como o conjunto de operações a que o material é sujeito – desde que entra como matéria-prima até ser expedido como produto final. Por exemplo, o armazenamento do material, o controlo da fase de desumidificação e secagem e o estudo da contração pós-molde pode ter um peso importante na qualidade da peça. Cada etapa que o material percorre, cada estágio, pode influenciar a qualidade do produto final. Assim sendo, é imperativo compreender cada fase no sentido de ser possível controlar todo o processo produtivo.

Para além de produzir peças que correspondam às especificações do cliente, um dos desafios principais com que uma empresa se depara é o de atingir um processo robusto e consistente, i.e., consistência de cavidade para cavidade, injeção para injeção e de um processo para outro. (2)

2.2.3 Os tipos de consistência necessárias na moldação por injeção

O principal objetivo no desenvolvimento de um processo de injeção é o de obter um processo robusto que não sofrerá alterações após este ser inicialmente definido. Consistência no processo originará consistência na qualidade e assim atingir um grau de eficiência mais elevado. Existem três tipos diferentes de consistência: cavidade para cavidade (Figura4), injeção para injeção (Figura5), e processo para processo (Figura6). A consistência de cavidade para cavidade é necessária quando se trata de moldes multi-cavidade, em que é necessário atingir o mesmo nível qualitativo em cada uma das cavidades.

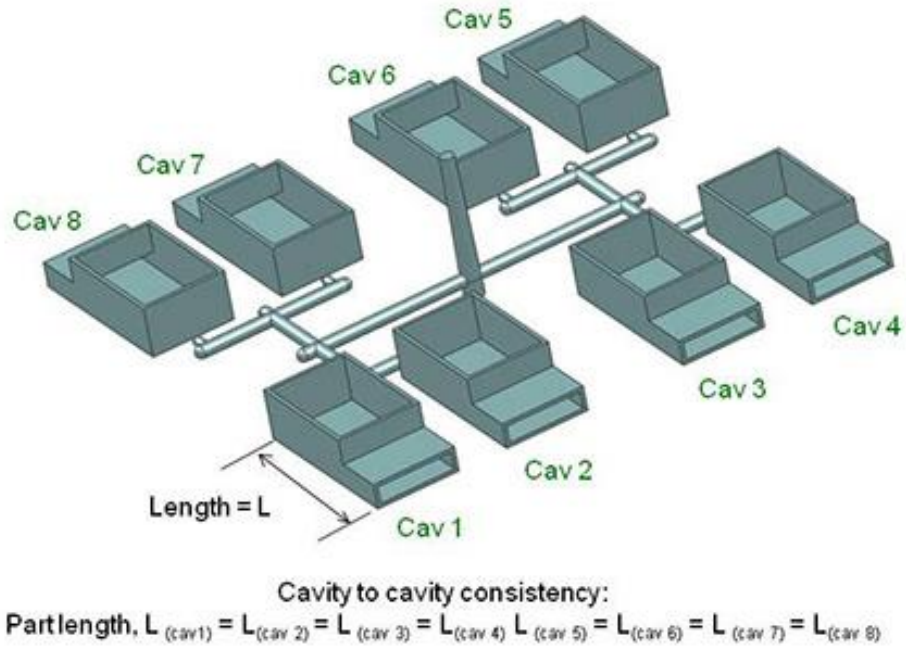


Figura 4: Consistência de cavidade para cavidade *(2)*

No que diz respeito à consistência de injeção para injeção, isto implica que cada injeção consecutiva será idêntica à anterior e com os parâmetros do processo mantendo-se iguais durante toda a produção.

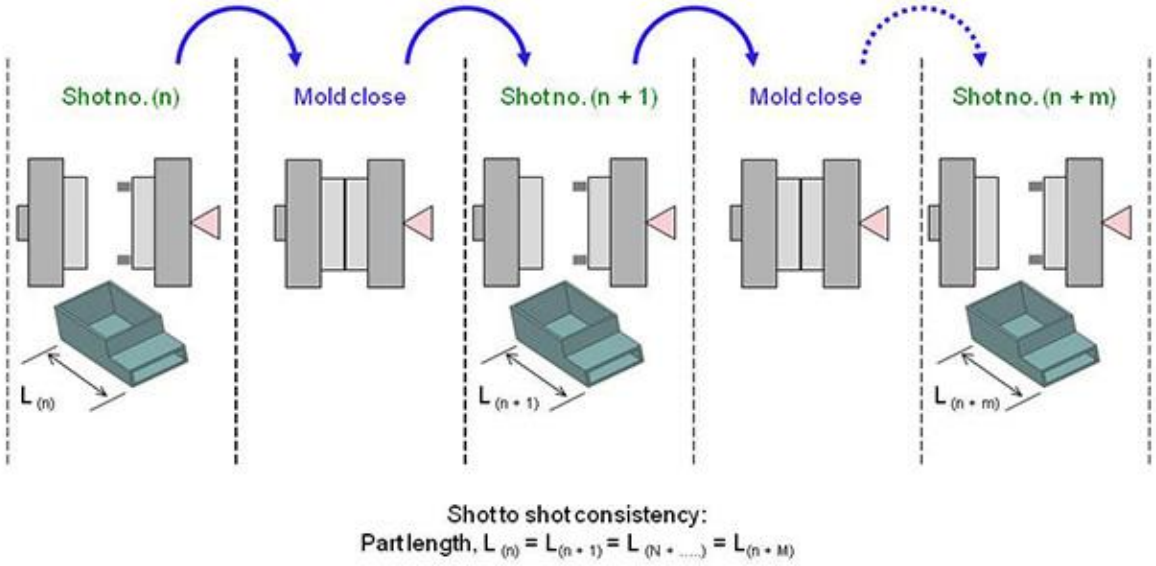


Figura 5: Consistência de injeção para injeção *(2)*

No caso de estarmos perante dois processos distintos, mas que sejam definidos segundo os mesmos parâmetros de injeção, trata-se de um exemplo de consistência de processo para processo. (2)

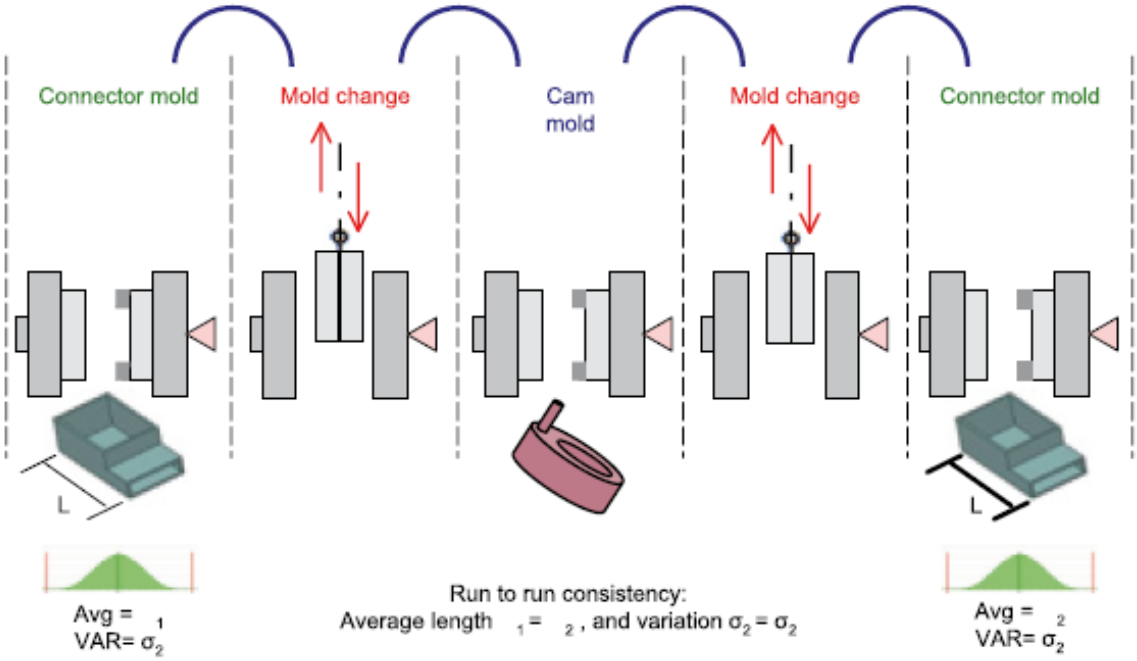


Figura 6: Consistência de processo para processo *(2)*

2.2.4 Processo de moldação cientifico

Um processo de moldação científico é um processo capaz de atingir a consistência na qualidade do produto final através da aplicação de conhecimentos e princípios científicos. De fato, para obter-se consistência, é necessário sermos capazes de controlar cada atividade e cada etapa que constitui o processo de injeção. O objetivo do processo científico prende-se sempre com a obtenção de um processo robusto e estável. Atingir essa mesma robustez em cada um dos diferentes estágios que o material percorre, irá traduzir-se num processo global robusto. É importante ter em consideração que o termo consistência não deve ser confundido com o alcance das especificações exigidas no produto. Um processo consistente irá desenvolver peças que se mostrem ser consistentes, no entanto podem estar fora das especificações. Neste caso, o molde deve ser ajustado com o intuito de produzir peças dentro das especificações exigidas e o processo não deve sofrer alterações.

O termo ***Scientific Molding***, foi promovido por dois pioneiros do ramo da moldação por injeção, John Bozzeli e Rod Groleau. Os princípios proferidos pelos mesmos são recorrentemente utilizados na indústria atualmente. Abaixo apresentam-se as várias etapas que correspondem ao percurso do material desde que este entra nas instalações:

- ↓ Material entra nas instalações;
- ↓ Armazenamento;
- ↓ Pré-condições;

- ↓ Molde;
- ↓ Processo de moldação;
- ↓ Ejeção da peça;
- ↓ Embalamento;
- ↓ Expedição.

O projeto descrito ao longo desta dissertação irá incidir sobre o processo de moldação por injeção no sentido de encontrar algumas das variáveis ideais para a obtenção de um processo robusto e estável. (2)

2.2.5 Fatores críticos do processo de moldação por injeção

A qualidade do produto final e o seu cumprimento de todas as especificações a que se propõe, está sujeita a cinco fatores críticos que devem ser cuidadosamente considerados (Figura7). São eles:

- Design da peça;
- Seleção do material;
- Design e construção do molde;
- Máquina de injeção;
- Processo de injeção.

Cada um destes fatores é bastante importante na produção de uma peça e, por consequência, devem ser tomados em conta. Convém novamente referir que, o objetivo final passará por obter um processo consistente e robusto, assim como a qualidade das peças de acordo com as especificações do cliente.

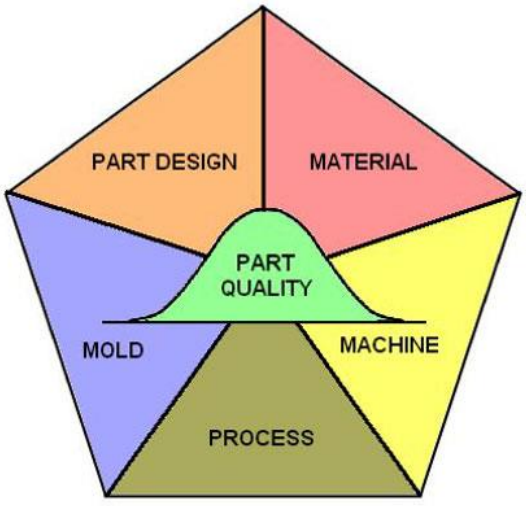


Figura 7: Os cinco fatores que influenciam a qualidade das peças *(2)*

O **conceito da peça** tem origem no desenho da mesma por alguém especializado. A peça deve contemplar um *design* próprio para ser moldada através do processo de injeção, levando em conta todas as regras de *design* de peças plásticas. Por exemplo, no sentido de evitar chupados na peça, deve evitar-se seções espessas e, por outro lado, todas as zonas bicudas devem possuir um raio para evitar concentração de tensões e falha prematura da peça. Com a evolução da tecnologia, os *designers* têm agora pela frente inúmeros desafios devido à necessidade de peças para montagem, como também de peças moldadas em diferentes materiais.

A **seleção do material** é também um aspeto importante na conceção de um determinado produto. Baseado no *design* e nas especificações da peça, o material deve ser corretamente selecionado, pois o próprio design da peça pode exigir algum tipo de aditivo ou material especifico para o efeito. Se na peça estiver presente uma secção espessa, pode ser necessário selecionar um material de enchimento, por outro lado, se a peça possuir uma superfície deslizante, talvez seja necessário a utilização de um aditivo para reduzir o coeficiente de atrito. A seleção do material deve ser, por norma, realizada quando os princípios base da peça são desenhados. Por ventura, pequenas alterações podem vir a ser feitas seguidamente.

Após completadas as duas etapas acima descritas, segue-se o **design e a construção do molde**. Este deverá ser robusto o suficiente para suportar o processo de injeção e claro, o material plástico. Por exemplo, durante o processo, o molde poderá ser sujeito a grandes esforços mecânicos, especialmente durante a fase de injeção e compactação do material. O ponto de injeção é uma das zonas de maior desgaste e existem pontos críticos, onde os gases acumulados devem ser expelidos para permitir a entrada de material no molde. Alguns plásticos podem necessitar de alguma atenção especial e o próprio molde deverá ser desenhado, tendo em conta esses mesmos materiais. A contração, por exemplo, pode variar consideravelmente de material para material. Todos as características individuais de cada material usado devem ser tomadas em conta. Por outro lado, o desgaste do molde deve ser considerado pois o material selecionado para a construção da estrutura do molde e cavidades afetam o tempo de vida do mesmo sendo necessária uma manutenção para garantir uma produção contínua.

A **seleção da máquina de injeção** desempenha um papel crucial na robustez e estabilidade do processo. Por exemplo, máquinas com uma elevada capacidade de injeção, não devem ser utilizadas em moldes com pouco volume de zona moldante, isto porque a consistência da qualidade irá ser alterada. O contrário, utilizar volumes de injeção de material elevado, pode originar problemas na homogeneidade do material e consequentemente, problemas no enchimento e dimensões da peça. Além disso, moldes

com dimensões pequenas, não devem ser colocados em máquinas de elevada tonelagem pois poderão danificar o molde devido à força de fecho excessiva.

Segue-se a otimização do **processo de injeção** que, após a chegada do molde, deverá ser posta em pratica para que se dê inicio a produção do produto em questão. O objetivo desta etapa está em concordância com o tema/objetivo desta dissertação. Convém salientar a importância da correta resolução de todas as etapas anteriores para que o processo de injeção seja definido sem constrangimentos. Neste estágio de desenvolvimento do projeto, o molde não deve possuir imperfeições pois originará uma janela de processamento pequena levando a um processo instável. Por outro lado, se o material selecionado não for capaz de assegurar as tolerâncias, o processo não será capaz de produzir peças satisfatórias. (2)

2.3 Introdução aos polímeros

Um polímero é um material constituído por moléculas de grandes dimensões, denominadas por macromoléculas, onde está presente uma cadeia central de átomos unidos por ligações covalentes. Estas longas cadeias de moléculas são frequentemente referidas como plásticos, sendo esta a designação comercial adotada para materiais obtidos através da moldação por injeção. Com recurso a um processo denominado por polimerização, os monómeros, parte unitária de uma cadeia polimérica, reagem quimicamente entre si, obtendo-se assim as macromoléculas.

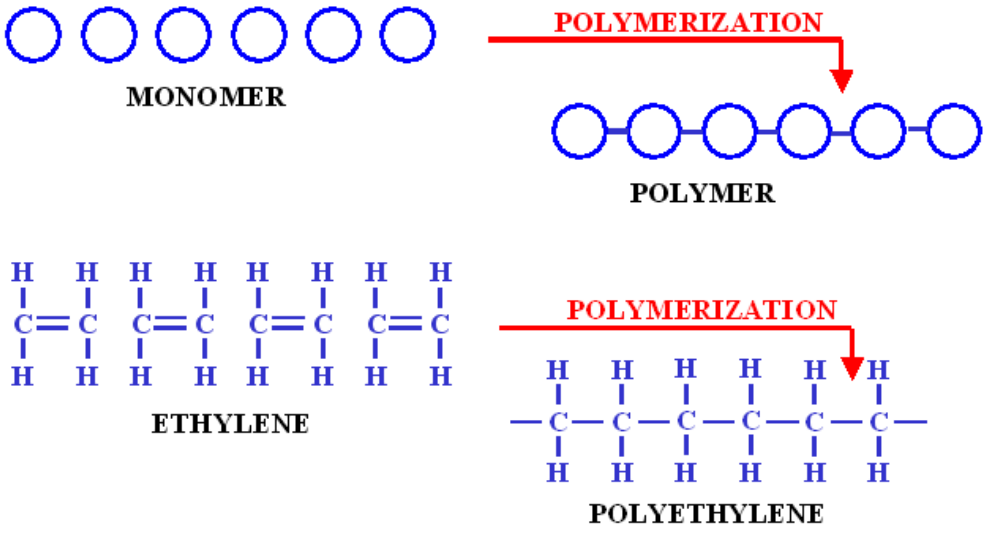


Figura 8: O processo de polimerização e formação do polietileno *(3)*

Os polímeros são materiais em abundância na natureza e estão presentes desde o início do tempo. O ácido ribonucleico (DNA) e o ácido desoxirribonucleico (RNA), que se apresentam como parte integrante de todos os seres vivos, são polímeros naturais. Atualmente, grande parte dos polímeros disponíveis no

mercado são sintetizados através de ingredientes naturais. Alguns dos polímeros que são possíveis encontrar na natureza incluem polissacarídeos e polipeptídeos como a seda, queratina e cabelo. A borracha natural é também um polímero natural, composta apenas por carbono e hidrogénio.

2.3.1 Enquadramento histórico

Os polímeros naturais vêm sendo usados em diversas aplicações desde a antiguidade. No entanto, a origem da ciência polimérica situa-se nos inícios do século XIX quando Mackintosh, em Inglaterra, descobriu que a dissolução da borracha em nafta de carvão permitia utilizá-la após a evaporação do solvente no revestimento de tecidos impermeáveis. Thomas Hancock desenvolveu as primeiras misturas de polímeros (borracha natural com guta percha). Por volta de 1839, Charles Goodyear descobriu que a borracha natural adquiria propriedades elásticas quando misturada com enxofre e aquecida (vulcanização).

Entre 1970 e 1872, os irmãos Isaiah e John Hyatt patentearam nos Estados Unidos, um material com um conjunto de características inovadoras, o nitrato de celulose plasticizado com cânfora e denominado por celuloide. Este material é possivelmente o primeiro termoplástico sintético produzido e surgiu no sentido de encontrar um substituto para o marfim na produção de bolas de bilhar.

Em 1888 já eram produzidos diversos artigos de grande consumo feitos em borracha, celulose ou guta-percha. Assim, Dunlop desenvolveu o primeiro pneu comercial insuflável, constituído por um tubo com ar, coberto com um pano e preso a um disco de madeira.

Leo Baekeland, em 1907, desenvolveu o primeiro polímero sintético através da condensação do fenol e do formaldeído: a baquelite. Este representa o primeiro polímero termoendurecível produzido e que, ainda hoje é frequentemente usado em caixas e ligações elétricas. Entre 1917 e 1930, químicos alemães dão passos importantes no desenvolvimento da indústria da borracha sintética. Isto para responder à necessidade da indústria em encontrar mais e melhores alternativas às matérias-primas existentes.

Herman Staundinger, em 1924, propõe o conceito de que um polímero é constituído por uma cadeia molecular longa. Esta proposta enfrentou certas dificuldades na sua aceitação, mas que eventualmente conduziram Herman, à atribuição do prémio Nobel da química em 1953.

Em 1933, três investigadores da ICI, Swallow, Gibson e Fawcett descobrem o polietileno. W. M. Carothers, em 1934, patenteou o nylon (uma poliamida).

Já na década de 50, Karl Ziegler e Guilio Natta descobrem que a polimerização, na presença de certos catalisadores organometálicos, produz polímeros com regularidade estereoquímica, recebendo assim o Prémio Nobel da química em 1963.

Na década de 70 surgem polímeros de engenharia com propriedades especiais, como o poli (sulfureto de fenileno) e o kevlar e, nos anos 80, os polímeros cristalinos líquidos.

Atualmente, a produção e comercialização de novos polímeros é extremamente difícil e dispendiosa. Assim, o desenvolvimento de novos materiais de engenharia pela mistura de dois ou mais polímeros e a modificação de plásticos já existentes, apresentam-se como sendo a alternativa mais promissora.

2.3.2 Classificação dos materiais poliméricos

Os polímeros são constituídos por cadeias macromoleculares longas, em que o tamanho das suas cadeias (moléculas) tem um efeito determinante nas suas propriedades. Uma possível classificação para os inúmeros tipos de polímeros baseia-se na semelhança de propriedades (Figura9).

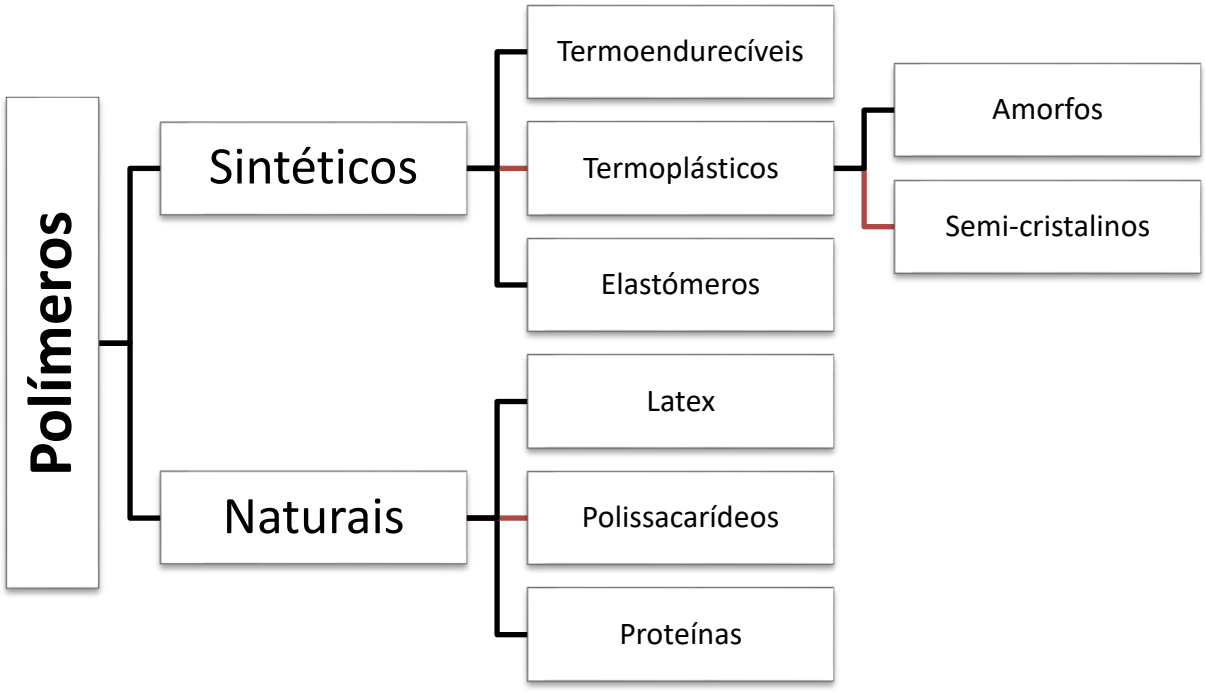


Figura 9: Classificação dos materiais poliméricos

Elastómeros ou componentes de borracha como o latex, são polímeros de cariz natural ou sintética que apresentam uma rede macromolecular com baixa densidade de reticulações (entrelaçamentos de cadeias). Este tipo de material apresenta uma deformação significativa aquando da aplicação de uma determinada tensão. No entanto, a característica que os distingue prende-se com o facto de recuperarem rapidamente a dimensão inicial após a remoção da tensão inicialmente aplicada.

Os termoendurecíveis, ao contrário dos elastómeros, são polímeros altamente reticulados, de elevada rigidez, constituídos por uma rede molecular tridimensional. Devido ao seu grau de reticulação, estes materiais não fundem quando aquecidos.

Os termoplásticos são plásticos constituídos por macromoléculas de cadeia linear ou ramificada que fundem quando aquecidos, sendo possível que a sua forma seja alterada. Geralmente, este processo pode ser repetido sem perda significativa de propriedades. Os termoplásticos podem classificar-se consoante cristalizam ou não quando arrefecem, o que depende de inúmeros fatores, tais como a densidade de ramificação e a regularidade das moléculas. Estes materiais que cristalizam totalmente são designados por cristalinos e aqueles que cristalizam apenas parcialmente, são denominados por semi-cristalinos.

2.4 Morfologia dos polímeros

A morfologia dos polímeros pode ser explicada como sendo a forma como as moléculas se arranjam numa determinada amostra. Baseado nas diferentes formas que as moléculas podem adotar, existem dois tipos de morfologia conhecidos – amorfos e os semi-cristalinos. Nos polímeros amorfos, as moléculas estão dispostas aleatoriamente, sem nenhuma estrutura ou arranjo definido. Por outro lado, em polímeros semi-cristalinos, existem certas regiões onde as moléculas estão dispostas de uma maneira ordenada e estruturada. Cada uma destas regiões é designada por esferulites e o grau de cristalinidade de um polímero refere-se à quantidade de esferulites que este possui. Quer isto dizer que, nenhum polímero é completamente cristalino e desta forma podemos afirmar que existem esferulites no meio de zonas amorfas.

a) b)

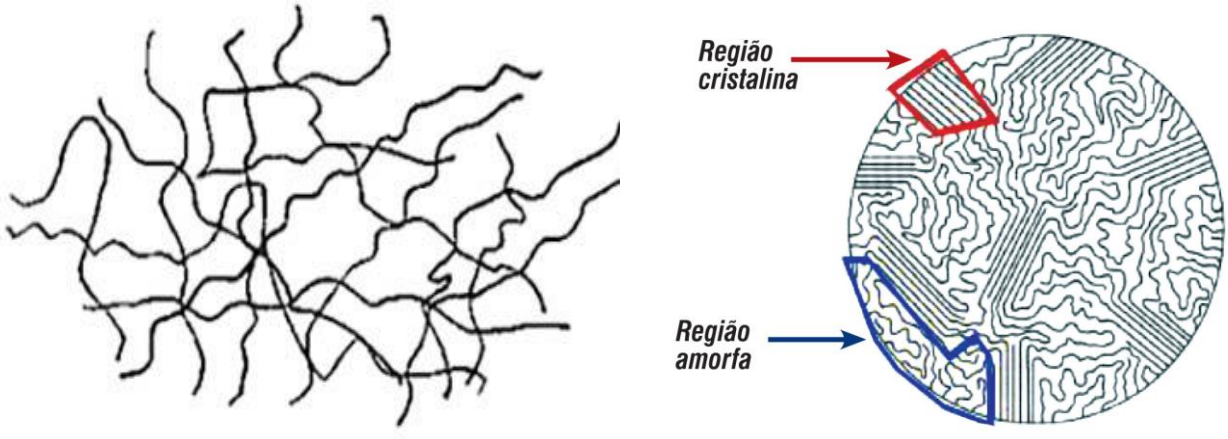


Figura 10: a) Polímero amorfo *(4)*, b) Polímero semi-cristalino *(5)*

2.5 Importância da morfologia dos polímeros na moldação por injeção

As características de processamento dos materiais semi-cristalinos e amorfos são distintas. As esferulites são formadas devido a elevadas forças de atração molecular e porque as cadeias não enfrentam obstáculos para se formarem. Por vezes, a presença de apenas uma outra molécula ou alguma zona de uma cadeia é o suficiente para prevenir o processo de cristalização. Durante a fase de aquecimento do polímero, no processo de injeção, as esferulites devem estar dissolvidas e as cadeias separadas entre si com vista a reduzir a viscosidade e possibilitar a injeção do material fundido no molde. É devido a estes fenómenos de formação e de solvência das esferulites que dita as várias diferenças no processamento e comportamento térmico destes materiais. (2)

2.5.1 Diferença na contração entre os polímeros amorfos e semi-cristalinos

A contração diz respeito à mudança volumétrica entre a fase borracha e o patamar vítreo. À medida que a temperatura se eleva, as moléculas ganham mais energia e por sua vez mobilidade, separando-se uma das outras. Este processo resulta no aumento do volume do polímero. O volume intermolecular é designado por volume livre. Por outro lado, à medida que o material arrefece, o volume livre diminui, fenómeno este designado por contração. Nos polímeros semi-cristalinos, o movimento de separação entre cadeias é muito maior quando comparados com os polímeros amorfos. À medida que as moléculas arrefecem, estas ordenam-se de forma muito estruturada e compactada, o que contribui para os seus valores de contração altos. A inexistência de zonas cristalinas nos polímeros amorfos, faz com que as cadeias não tenham uma posição específica para solidificar durante a fase de arrefecimento, resultando num valor de contração bem mais baixo. (2)

2.5.2 Janela de temperatura de processamento

Similar a um cristal de gelo, as esferulites precisam de uma quantidade específica de energia para fundir. Devido às zonas cristalinas, os materiais semi-cristalinos possuem uma janela de temperatura de processamento apertada, geralmente, a diferença entre a temperatura mínima e máxima de processamento recomendada pelo fornecedor é de 20°C. Deste modo, quanto menor a percentagem cristalina do material, mais larga será a sua janela de processamento (Figura11).

No caso dos materiais amorfos, não existe temperatura de fusão, mas sim um intervalo de temperaturas no qual o material possui uma viscosidade baixa o suficiente para ser injetado e preencher as cavidades do molde (Figura11). (2)

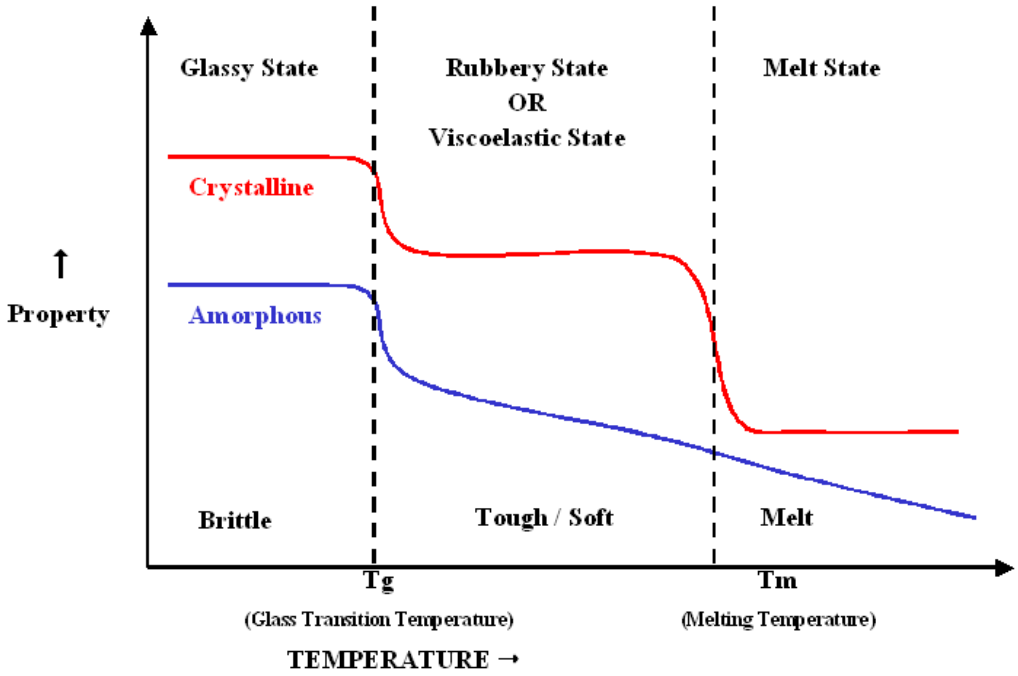


Figura 11: Transições térmicas e intervalos de temperaturas de processamento para materiais amorfos e semi-cristalinos *(3)*

2.5.3 Velocidade de injeção

A viscosidade está inversamente relacionada com a temperatura de fundido, isto é, à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade por sua vez, diminui. Como consequência, à medida que o material flui através da superfície fria do molde, a temperatura do material desce e a viscosidade aumenta. Uma vez que os materiais semi-cristalinos possuem uma janela de processamento estreita, a temperatura da frente do fluxo não deve ser menor que a temperatura mínima de processamento recomendada. Desta forma, a natureza cristalina destes materiais dita que devem ser injetados o mais rápido possível no molde. Por outro lado, os materiais amorfos, visto que possuem uma janela de processamento mais alargada, velocidades de injeção baixas são aceitáveis, desde que a frente do fluxo se mantenha acima da temperatura mínima recomendada. (2)

2.5.4 Temperatura do molde

Da mesma forma que existe uma temperatura à qual as esferulites fundem, existe também a temperatura à qual estas cristalizam, a temperatura de cristalização que é menor do que a temperatura de fusão. A esta temperatura, as esferulites possuem energia suficiente para se formarem e, caso o molde se encontre a uma temperatura muito baixa, o material não irá receber essa energia, impedindo a formação das esferulites. É importante ter em nota que este processo leva à perda de propriedades na peça e por essa mesma razão, os fornecedores de matéria-prima realizam um estudo intensivo com o intuito de

determinar qual o intervalo de temperatura do molde ideal. Por essa razão, é imperativo seguir as recomendações do fornecedor para materiais semi-cristalinos. Uma vez que as esferulites não estão presentes nos materiais amorfos, o intervalo de temperaturas do molde poderá ser maior e até mesmo estendido abaixo da temperatura mínima recomendada. Como não há de formação de esferulites, as moléculas não necessitam de uma quantidade de energia específica, ou seja, temperaturas baixas são aceitáveis. No entanto, é necessário ter cuidado com as tensões residuais devido às temperaturas muito baixas. (2)

2.5.5 Perfil de temperaturas no cilindro de injeção

No cilindro de injeção, a rotação do fuso tem como funções as de fundir e transportar o material polimérico granulado. O material entra primeiramente em contato com a base do fuso. Esta seção é projetada de maneira a facilitar o transporte e o amolecimento dos grânulos. No caso dos materiais semi-cristalinos, visto que as esferulites necessitam de mais energia para fundir, esta zona do fuso é colocada a uma temperatura superior do que as seguintes de modo a iniciar o amolecimento das moléculas. Um outro fator que leva à redução das temperaturas nas zonas seguintes é o fato de que alguns materiais semi-cristalinos são sensíveis ao calor ou não toleram longos períodos de tempo a altas temperaturas. Desta forma, o perfil de temperatura para materiais semi-cristalinos possui geralmente um pico no meio. No caso dos materiais amorfos, tal perfil não é necessário porque não necessitam de tanta energia para amolecer e estes conseguem tolerar longos períodos de residência no cilindro de injeção (Figura12). (2)

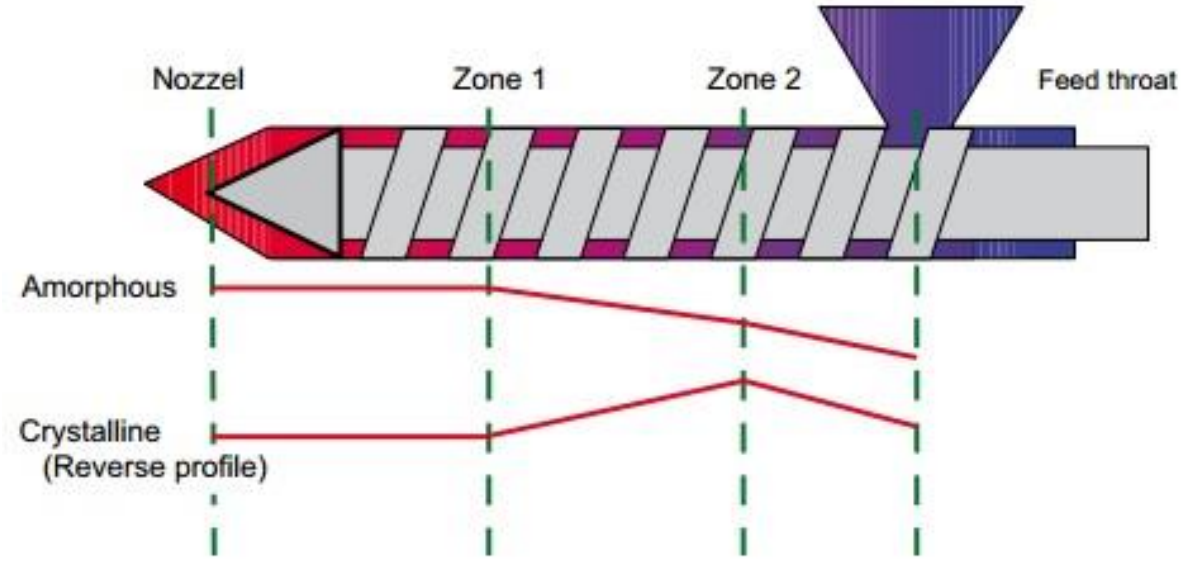


Figura 12: Perfil de temperaturas no cilindro para materiais amorfos e semi-cristalinos *(2)*

2.5.6 Velocidade de rotação do fuso

As resistências presentes no cilindro de injeção fornecem energia sob a forma de calor no exterior do cilindro. Atendendo a este aspeto e tendo em conta que os polímeros são maus condutores de calor, o material junto ao fuso e mais afastado das paredes do cilindro, necessita de energia adicional para ser plasticizado. É para combater este défice de energia que serve o movimento de rotação do fuso que, promove atrito entre as cadeias poliméricas, gerando-se então a energia adicional requerida para a plasticização completa. Uma velocidade de rotação alta, irá gerar elevadas taxas de corte, facilitando a fusão das esferulites e assegurando a homogeneidade do fundido. Já para os materiais amorfos, devido à baixa quantidade de energia necessária para promover o amolecimento do material, não é necessária uma velocidade de rotação do fuso alta. De fato, velocidades altas pode gerar a degradação do material e originar defeitos como por exemplo, raiados. (2)

2.5.7 Controlo de temperatura no bico de injeção

O controlo da temperatura no bico de injeção é um aspeto critico a ter em conta quando se trabalha com materiais semi-cristalinos. Não deve apenas estar de acordo com o intervalo de temperaturas de processamento indicadas, como também ser mantida a um intervalo ainda mais estreito, principalmente nas fases de fluxo estático, que ocorre entre o fim da fase de pressurização e o início da fase de injeção. Temperaturas baixas proporcionam a solidificação prematura do material no bico de injeção, tornando impossível a injeção seguinte. Por outro lado, com temperaturas demasiado altas, as zonas cristalinas tendem a desaparecer, provocando uma diminuição na viscosidade que, por sua vez, origina perda de material pelo bico de injeção. Com os polímeros amorfos, a larga janela de processamento alargada ajuda a manter uma viscosidade aceitável no processo de injeção, evitando a solidificação prematura do material ou a perda deste através do bico de injeção. (2)

2.5.8 Tempo de arrefecimento

Uma vez formadas as esferulites, a peça moldada adquire força suficiente e apenas necessita de uma pequena descida de temperatura para ser ejetada do molde. Deste modo, no caso dos polímeros semi-cristalinos, o tempo de arrefecimento é menor comparado aos polímeros amorfos (para a mesma espessura de peça). Em alguns casos, são adicionados agentes nucleantes com o intuito de acelerar o processo de cristalização e, por consequência, reduzir ainda mais o tempo de arrefecimento. De salientar

que agentes nucleantes não possuem qualquer efeito em polímeros amorfos pois estes não possuem zonas cristalinas. (2)

2.6 Reologia dos polímeros

2.6.1 Introdução à reologia

A reologia é a ciência responsável pelo estudo do escoamento e deformação da matéria e, em especial, a análise das relações entre tensão, deformação e tempo para materiais viscoelásticos. No que diz respeito à caracterização de materiais poliméricos, a reologia apresenta-se como sendo a ferramenta ideal para o efeito. Considerando uma determinada solicitação mecânica, a resposta a este estimulo está intrinsecamente relacionada com a estrutura e morfologia dos polímeros, o que naturalmente influenciará o cumprimento das especificações por parte do produto. Para medições efetuadas a taxas de deformação baixas, a resposta dada por estes materiais poderá ser relacionada com as características estruturais do sistema (grau de ramificação, massa molecular e a sua distribuição). Assim, a reologia é capaz de nos fornecer indicações importantes relativas à possessibilidade dos materiais poliméricos. (6)

2.6.2 Comportamento viscoelástico

Quando um corpo é submetido a um estimulo mecânico externo e apresenta características típicas de um material viscoso e de um elástico, diz-se que este material possui um comportamento viscoelástico. Assim, este tipo de material irá deformar continuamente após a ação de um estimulo mecânico externo (comportamento típico de sólidos elásticos) e, adicionalmente, vai ser capaz de recuperar alguma da deformação sofrida (comportamento viscoso). Paralelamente, irá apresentar também valores não nulos para tensões normais. Os polímeros são, na sua grande maioria, materiais que possuem um comportamento viscoelástico. (6)

2.6.3 A reologia na moldação por injeção

No caso do processamento de polímeros através da moldação por injeção, o papel da reologia torna-se importante logo no escoamento do fundido nos canais de alimentação e ataques. Relativamente aos canais de alimentação, estes são responsáveis pelo transporte do material até à cavidade, e, consequentemente, terão que assegurar a fluidez do material sem provocar quedas de pressão

significativas. Neste sentido, a seção circular apresenta-se como sendo a melhor solução pois é aquela que minimiza as quedas de pressão.

Analisando agora o caso do escoamento nos ataques, estes envolvem taxas de corte superiores às do escoamento em canais de alimentação, o que leva assim a valores baixos de viscosidade do material, facilitando a relaxação de tensões posterior.

Após o escoamento do fluido no ataque, segue-se a sua passagem na cavidade do molde. Inicialmente, o fundido ao entrar em contato com as paredes frias do molde, começa logo a solidificar, formando assim uma casca que provoca um aumento na taxa de corte em relação ao que seria de se esperar pois a secção disponível para a passagem do fluido é encurtada. Paralelamente a este fenómeno, o material não se encontra todo à mesma temperatura, estando a mais quente no centro e assim, a viscosidade nesse ponto será menor, facilitando então o escoamento. Dito isto, o escoamento do fundido não é, naturalmente, uniforme e designa-se por "escoamento em fonte". (6)

2.7 Armazenamento e desumidificação da matéria-prima

A matéria-prima é fornecida às empresas de injeção de produtos plásticos de variadas formas. Dependendo do tipo de material, existem certos cuidados que devem ser assumidos aquando da receção do mesmo como por exemplo, os materiais acrílicos que não devem ser armazenados em locais expostos à luz solar pois poderão resultar na perda de cor ou transparência. Este tipo de matéria-prima deve ser conservado num local seco para evitar a absorção de humidade. Existem algumas entidades de fornecimento de material plástico abastecem os materiais higroscópicos já desumidificados e em sacos devidamente selados. Tais matérias não necessitam de estufagem e podem ser utilizadas diretamente na máquina de injeção. A identificação da matéria-prima e o registo contínuo de todas as matérias em utilização, é considerada uma boa prática de produção.

Materiais higroscópicos devem ser estufados com o objetivo de evitar a perda de propriedades, manchas na superfície e/ou defeitos internos. A perda de propriedades em algumas matérias é o resultado da degradação hidrolítica. Noutros casos, a presença de humidade resulta em defeitos superficiais, tais como raiados ou defeitos internos como por exemplo, vazios.

O tempo específico e a temperatura correta de estufagem são relativas ao tipo de material, mais concretamente, à força da ligação química que a água forma com o polímero. Por exemplo, o PBT (polibutileno tereftalato) precisa de estufar a oitenta graus celsius durante quatro horas e, por outro lado, o policarbonato necessita de 121ºC, durante cerca de três horas.

Hoje em dia, são adicionados aditivos ao material base com o intuito de melhorar as suas propriedades para aplicações específicas e/ou para reduzir o seu custo. Aditivos como, plasticizantes, lubrificantes, retardadores de chama, estabilizadores de calor, corantes, agentes expansores, etc., são normalmente compostos por moléculas de baixo peso molecular e/ou oligómeros em que se o tempo de estufagem for superior ao tempo máximo recomendado pelo fornecedor, é possível que se degradem e/ou se separem da matéria-prima base.

Em jeito de conclusão, podemos afirmar que o processo de desumidificação e secagem da matéria-prima é deveras importante na industria de transformação de materiais plásticos, evitando problemas no processo produtivo e/ou desempenho de funcionalidades do produto. (2)

2.8 Capabilidade

Existem métodos e ferramentas de análise estatística que quando aplicadas ao processo produtivo de uma empresa, fornecem dados relevantes à avaliação do desempenho do mesmo. Neste sentido, surge o estudo da capabilidade. Este estudo poderá ser aplicado ao processo e á máquina responsável pelo mesmo. Nesta dissertação, será feito a análise apenas da máquina e a sua influência a nível de variações provocadas no processo. (7)

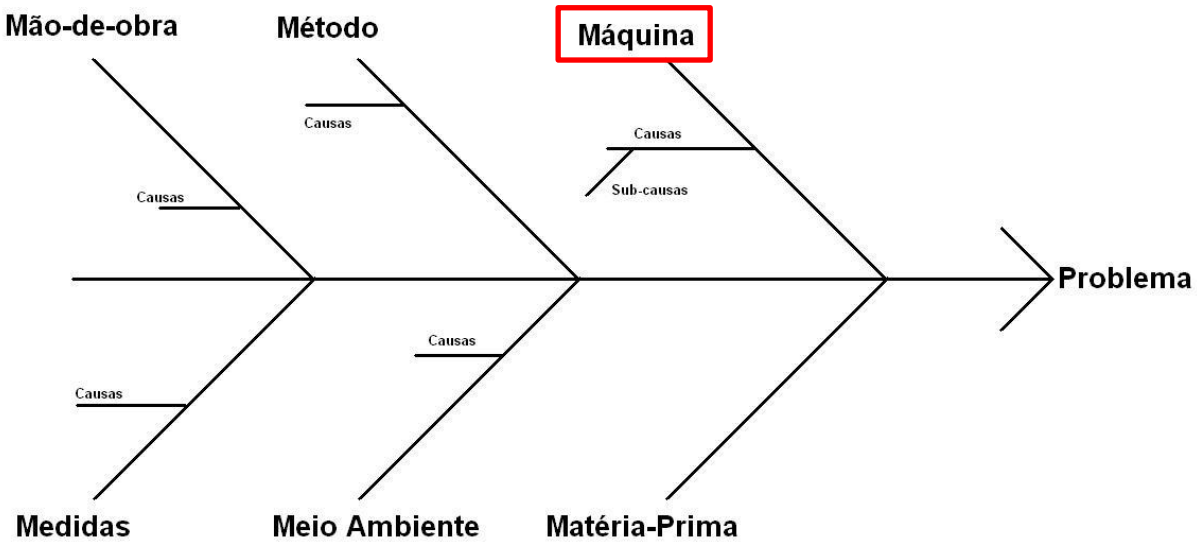


Figura 13: Diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa-efeito *(6)*

O diagrama acima representado (Figura 13), indica as cinco fontes distintas de variação inerente do processo. No caso em especifico como o estudo da capabilidade da máquina, é necessário isolar todas as fontes excetuando a máquina que será o nosso objeto de estudo. Os estudos de capabilidade referidos foram realizados para o caso de estudo 3, os mesmos estão presentes nos Anexos III e IV.

3. PROCESSO EXPERIMENTAL

O processo de moldação cientifico pode ser interpretado de forma a constituir um conjunto de seis etapas sequenciais que nos permitirão encontrar a maioria dos parâmetros de injeção ótimos para uma determinada peça ou produto. Neste capitulo será feita uma breve descrição do método utilizado, contendo todos os passos necessários para a conclusão de cada etapa. O procedimento descrito neste capitulo está contemplado numa folha de cálculo, onde todos os dados obtidos foram devidamente organizados e posteriormente analisados de forma a gerarem conclusões relativas ao estudo em curso.

3.1 Os 6 passos para o estudo da otimização do processo

3.1.1 Etapa 1: Otimização da fase de injeção – Estudo reológico

Quando se está perante qualquer tipo de plástico fundido, este irá apresentar um comportamento de um fluido não-newtoniano. Isto significa que a sua viscosidade não se irá manter constante quando sujeito a diferentes taxas de corte, ou seja, variações na velocidade ao longo do escoamento. Curiosamente, o plástico exibirá uma combinação entre um comportamento newtoniano e um não newtoniano. Quando sujeito a baixas taxas de corte, situação rara no processo de injeção, o plástico tem um comportamento semelhante ao de um sólido, mas quando sujeito a taxas de corte elevadas, este já irá apresentar um comportamento de um fluido.

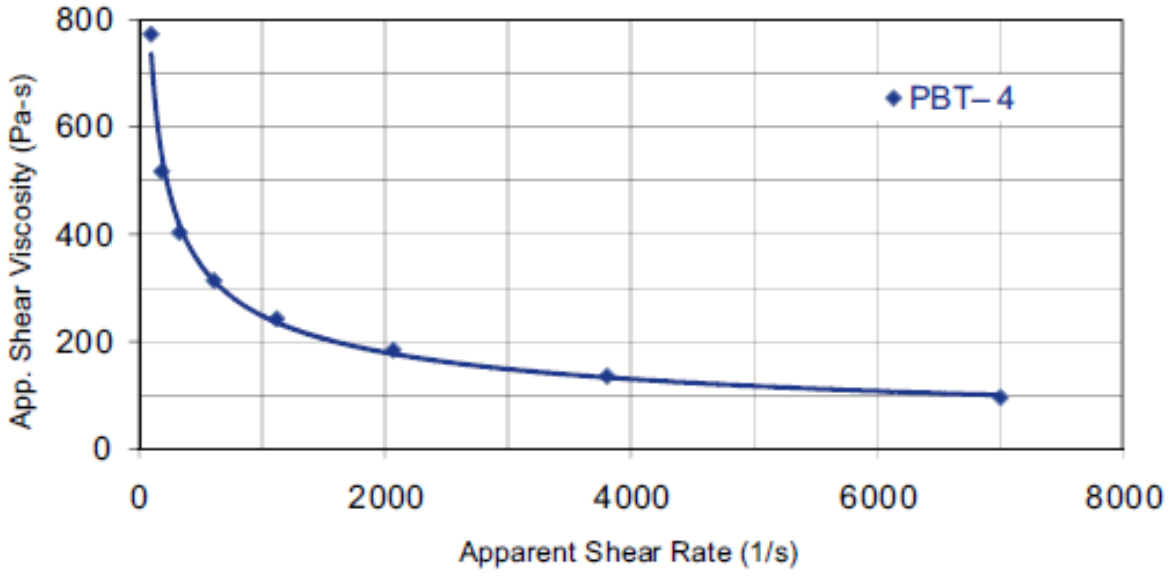


Figura 14: Viscosidade do PBT representada numa escala linear *(2)*

No gráfico da Figura14 está representado a viscosidade do PBT (Polibutileno Tereftalato) numa escala linear. É possível observar que a variação da viscosidade é bastante mais acentuada quando o material está sujeito a taxas de corte baixas do que quando se manifestam taxas de corte mais elevadas. Este fenómeno deve-se ao fato de que com o aumento da taxa de corte, as moléculas do polímero tendem a alinharem-se umas das outras e ficarem cada vez mais alinhadas de acordo com a orientação do fluxo, baixando assim o número de entrelaçamentos (Figura15). Tendo em conta que a viscosidade se caracteriza como sendo a resistência do material ao fluxo, esta será mais reduzida, valores de viscosidade mais baixos que se verificam a taxas de corte mais elevadas. Assim, o plástico exibe um comportamento mais newtoniano quando sujeito a taxas de corte elevadas. Neste período, existe uma queda linear da viscosidade, mas não tão significativa como quando o material é submetido a baixas taxas de corte.

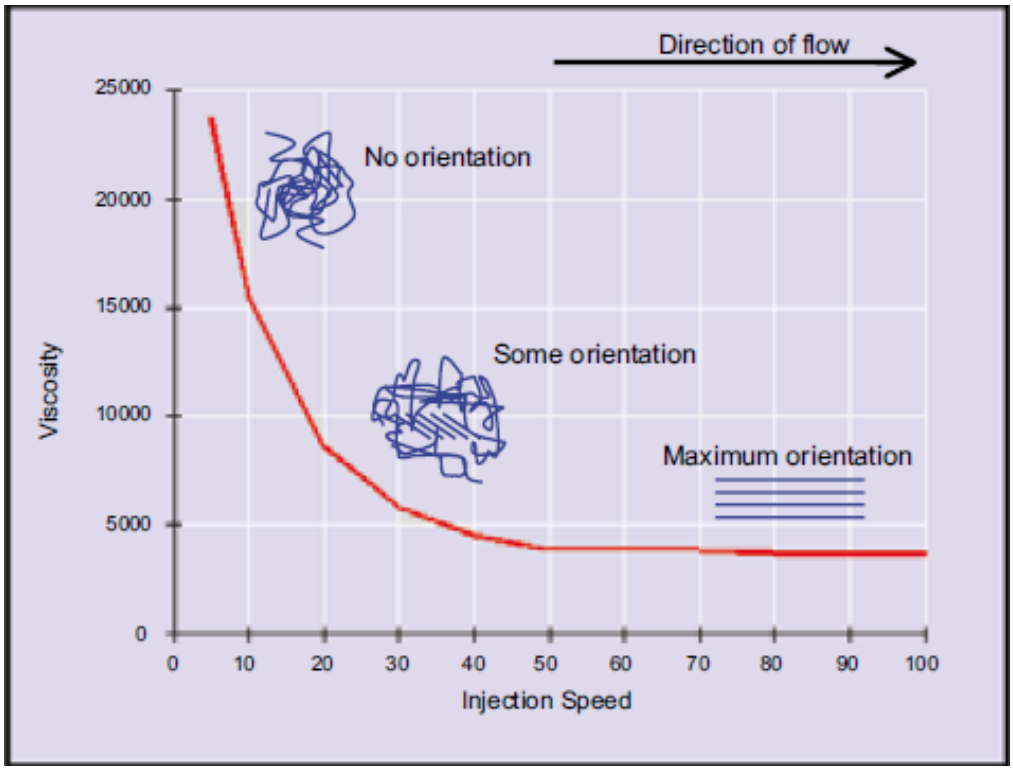


Figura 15: Orientação das moléculas na direção do fluxo segundo diferentes velocidades de injeção *(2)*

Durante o processo de injeção, o material é sujeito a taxas de corte elevadas durante a fase de injeção. Essas são proporcionais à velocidade de injeção definida para o processo. Se as taxas de corte forem de ordem reduzida, então, pequenas alterações na velocidade irão induzir grandes variações na viscosidade do material. Isto irá provocar um enchimento não uniforme na cavidade do molde, originando falta de consistência entre as moldações produzidas. No entanto, se a velocidade de injeção for elevada, as taxas serão também elevadas, ou seja, a variação na viscosidade será extremamente reduzida. Assim, será

possível obtermos consistência de moldação para moldação, visto que o enchimento será tendencialmente constante. Assim, pequenas variações no equipamento já não se irão traduzir em grandes variações na viscosidade do material que por sua vez, não provocará alterações significativas nas propriedades das moldações.

Procedimento para determinar a curva de viscosidade e velocidade de injeção:

- Definir a temperatura de processamento de acordo com a ficha técnica do material, facultada pelo fornecedor;
- Retirar completamente a segunda pressão ou pressão de compactação;
- Definir a pressão de injeção para o valor máximo permitido pela máquina;
- Definir um tempo de arrefecimento capaz de permitir a correta extração da peça;
- Definir uma velocidade de injeção baixa e observar a moldação produzida. Esta deverá ser uma moldação curta que garanta que a velocidades superiores a peça continua sem estar completa;
- Aumentar a velocidade de injeção, sempre garantindo peças curtas;
- Moldar uma peça perto da velocidade de injeção máxima e verificar que a mesma ainda está incompleta. Caso já se encontre completa, aumentar o ponto de comutação até que a peça esteja a aproximadamente 95% do peso final;
- Retirar outra peça com a velocidade de injeção perto do máximo e, registar a pressão máxima de injeção e o tempo de enchimento. **Nota:** esta pressão não é necessariamente a pressão máxima de injeção;
- Diminuir a velocidade de injeção em aproximadamente 10% da velocidade definida anteriormente e registar o tempo de enchimento e a pressão máxima de injeção;
- Repetir o passo anterior, de modo a obter aproximadamente 10 medições;
- Registar os valores obtidos para todas as moldações produzidas e obter a curva da viscosidade.

Os passos acima descritos serviram de guia para o desenvolvimento do trabalho prático. Com os dados obtidos nesta etapa e, com auxilio de uma folha de calculo, devidamente preparada para o efeito, foi possível a obtenção da curva da viscosidade. Relativamente à folha de cálculo, nela são registados os valores de pressão que se verificam no fundido, juntamente com o tempo de injeção obtido para cada valor de velocidade de injeção. Posteriormente, determina-se a taxa de corte (inverso do tempo de injeção), de seguida a viscosidade aparente (o produto da pressão especifica no fundido e o tempo de injeção) e por fim a velocidade real que é imposta ao fundido. Através destes cálculos, é possível obter um gráfico que relaciona a viscosidade com a velocidade de injeção.

Assim, foi encontrada o intervalo de velocidades de injeção ideais para cada caso estudado.

3.1.2 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades

Determinar o balanceamento das cavidades é crucial para o correto desenvolvimento de um processo de injeção. Assim como em todos os casos estudados neste projeto, grande parte dos moldes de injeção são multi-cavidade e são, naturalmente, sujeitos a que o enchimento ao longo das cavidades não seja uniforme. Isto poderá dever-se a defeitos de fabrico no molde (a construção do molde tem que prever que o material chegue nas mesmas condições a cada cavidade que o constitui). O fato do enchimento não ser igual nas diferentes cavidades, irá provocar que as diferentes peças moldadas apresentarão dimensões e pesos distintos, ou seja, a consistência entre cavidades será afetada. Garantir um correto balanceamento em todas as cavidades do molde é então uma das bases a serem asseguradas para que todas as outras alterações aplicadas no processo, afetem igualmente cada uma das peças injetadas. Podem existir várias razões para o não balanceamento de cavidades no molde, tais como:

- **Variações nos canais de fluxo:** se os canais que alimentam as cavidades do molde de material plástico fundido não forem idênticos, existirão mais restrições ao fluxo numa cavidade do que noutra. Assim, o enchimento não será uniforme;
- **Variações de ventilação:** são adicionados canais de ventilação no interior do molde que permitem que o ar presente na cavidade seja expelido para o exterior e dar lugar ao material fundido. Assim, estes canais terão que ser capazes de possibilitar a saída do ar da cavidade ao mesmo ritmo a que o material está a entrar. Os canais terão também que possibilitar a saída de ar de maneira semelhante para todas as cavidades.
- **Variações no arrefecimento:** a temperatura do molde tem um impacto bastante significativo na fluidez do plástico, especialmente com materiais semi-cristalinos e em peças com longos canais de fluxo. Geralmente, temperaturas mais elevadas irão promover um maior fluxo de material fundido a percorrer o molde, afetando também a contração do plástico. Assim, caso o arrefecimento não seja uniforme para as inúmeras cavidades, o material irá fluir e contrair de maneira não uniforme em cada cavidade, provocando então variações dimensionais.

Procedimento para determinar o balanceamento de cavidades:

- Definir a segunda pressão ou pressão de compactação para zero;
- Definir o tempo de segunda pressão ou pressão de compactação para zero;
- Definir um atraso na plasticização (dosagem) igual ao tempo estimado para a pressão de compactação. Exemplo: se o tempo de pressão de compactação estimado for de 10 segundos, atrasar também a dosagem em 10 segundos;

- Definir a velocidade de injeção tendo em conta os resultados da etapa 1;
- Usando os restantes parâmetros de injeção idênticos à primeira etapa, retirar peças quase completas;
- Aguardar que o processo estabilize e retirar amostras, pesando cada uma delas de forma independente;
- Registar os valores obtidos.

Após obtermos todas as amostras requeridas para o estudo, foi possível averiguar se os moldes que correspondiam aos casos de estudo definidos, estavam, de fato, balanceados ou não.

3.1.3 Etapa 3: Estudo da queda de pressão

Á medida que o plástico flui através das diferentes seções, desde o bico de injeção ao molde, a frente do fundido vai sofrendo perdas de pressão devido a efeitos de arrasto e fricção. Paralelamente, assim que o plástico entra em contato com as paredes do molde, este começa a arrefecer, promovendo um aumento na viscosidade do material que, consequentemente, implica a necessidade do aumento da pressão adicional para "empurrar" o material a um caudal constante. 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.

Procedimento para o estudo da queda de pressão:

Considere-se o fluxo da matéria prima desde a câmara até à peça: Bico da máquina, carburador, bico do canal quente (se o molde tiver alimentação por canais quentes), jito, ataque (se a alimentação for feita através de canais frios) e peça completa;

- Definir a pressão de injeção para o máximo admissível;
- Injetar um *shot* completo sem encostar o bico da máquina ao molde e registar o pico de pressão de injeção;
- Injetar um *shot* de forma a moldar apenas o canal quente (encher apenas o mínimo possível a peça/jito) e registar o pico de pressão de injeção;
- Injetar um *shot* de modo a moldar o jito curto (antes da matéria chegar à zona do ataque) e registar o pico de pressão de injeção;

- Injetar uma moldação completa e registar o pico de pressão de injeção.

Notas:

- A pressão máxima a utilizar não deverá exceder os 70% da pressão máxima de injeção, de forma a obter um processo estável;
- Caso o molde seja de canais frios, ou seja, sem carburador ou bico quente, ou não tenha jito (bico quente direto à peça), registar nesses campos o valor de pressão obtido no campo anterior. Exemplo: se o molde não contemplar jito, registar no campo do jito o valor da pressão obtida para o canal quente, ficando ambos os campos com o mesmo valor;
- Definir um atraso na dosagem significativo para que durante esta fase não entre mais matéria no molde;
- Retirar sempre pelo menos três moldações iguais e introduzi-las na Tabela auxiliar, usando a média para os cálculos principais.

Este estudo permite tirar uma serie de ilações quanto ao percurso do material pela máquina e molde. Assim, poderemos averiguar se as características da máquina serão as indicadas para a peça em questão e ainda, se o molde oferece um percurso adequado para que o material flua sem perda significativa de propriedades.

3.1.4 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação

A pressão de compactação tem como objetivo adicionar mais plástico para dentro do molde e assim compensar possíveis perdas na peça por efeitos de contração. A esta pressão de compactação, encontram-se associadas outras variáveis de processamento como o tempo de compactação, ou seja, o tempo a que sujeitamos o material a esta pressão. Relativamente ao ciclo de injeção, esta etapa apresenta-se como sendo crucial para obtermos uma moldação de acordo com o pretendido. Caso a peça não esteja devidamente compactada, poderão surgir defeitos como vazios ou chupados. Estas peças, geralmente, evidenciam uma contração significativa pós-moldação. No caso de se obter peças sobre-compactadas, estas podem evidenciar um elevado numero de tensões acumuladas que mais tarde poderão traduzir-se em perda de funcionalidades mecânicas.

Procedimento para determinar o tempo de compactação ou tempo de segunda pressão:

- Definir a velocidade de injeção obtida na etapa 1;

- Definir os restantes parâmetros de acordo com a ficha técnica da matéria-prima. O valor da pressão de compactação deverá ser aproximadamente 60 a 75% do pico de pressão de injeção (que deverá ser a pressão na altura da comutação);
- Definir um valor de tempo de arrefecimento suficiente para permitir a correta extração da peça;
- Definir o tempo de pressão de compactação a zero e moldar 5 a 8 peças;
- Aumentar o tempo de pressão de compactação de 1 em 1 segundo e parar quando existe dificuldade em extrair a peça do molde;
- Pesar as peças moldadas e registar os valores obtidos.

Após registarmos os dados obtidos neste processo, é possível obter uma curva que relaciona o peso das peças com o tempo de compactação. O peso tenderá a estabilizar, mesmo com largos aumentos ao tempo de segunda pressão. Caso o molde possua canais frios, este tempo é designado pelo tempo de solidificação do ataque.

3.1.5 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento

Após injetado, o plástico começa a arrefecer assim que entra em contato com as paredes frias do molde. Assim que termina o tempo de compactação, dá-se inicio o tempo de arrefecimento, previamente definido pelo operador. Durante este tempo, o molde encontra-se fechado e abre posteriormente para permitir a extração da peça(s). No entanto, caso a temperatura requerida para a extração da peça não seja atingida, esta poderá deformar-se durante a sua extração. Para além disso, se o tempo de arrefecimento for excessivo, o tempo de ciclo será naturalmente, desnecessariamente mais longo. Assim, será necessário encontrar o tempo de arrefecimento que se traduz no melhor compromisso entre o tempo de ciclo e a qualidade do produto final.

Procedimento para determinar o tempo de arrefecimento:

- Obter moldações com tempos de arrefecimento distintos;
- Determinar uma dimensão ou característica critica (deverá ser definida conforme a peça em estudo);
- Obter o gráfico que relaciona o tempo de arrefecimento com a dimensão critica escolhida anteriormente;
- Analisar os resultados obtidos e estudar o impacto do tempo de arrefecimento na propriedade adotada.

Para esta etapa, a dimensão ou propriedade crítica foi única para cada caso estudado. Adiante, nesta dissertação, será referido qual a característica adotada e o porquê da sua importância.
O tempo de ciclo é um fator importantíssimo em qualquer processo de injeção, visto que está diretamente relacionado com o lucro da empresa. Assim, tendo em conta que o tempo de arrefecimento ocupa uma larga fatia do ciclo de injeção, será necessário que este não seja desnecessariamente excessivo.

3.1.6 Etapa 6: Validação da almofada

Com o avanço do fuso, o plástico fundido é forçado a entrar nas cavidades do molde. O processo de enchimento é dinâmico e parâmetros como a temperatura do fundido, pressão e velocidade estão em constante variação. Após a fase de injeção, com a cavidade praticamente cheia, dá.se inicio à fase de compactação que é responsável por completar o enchimento do molde e compensar eventuais perdas de volume que acontecem após a extração da peça. No entanto, à medida que o fundido entra em contacto com as paredes do molde, este arrefece e perde velocidade, provocando um aumento na viscosidade do material. Assim, quando a viscosidade do material alcançar um valor tal que não permita a entrada de mais material no molde, considera-se que o ataque solidifica (em casos de moldes com um sistema de alimentação por canais frios) e o tempo que leva a chegar a este estágio, denomina-se por tempo de solidificação do ataque. No caso de moldes com canal quente direto à peça, este efeito é gerado pela solidificação da peça em si e portanto, qualquer pressão aplicada posteriormente será inútil. Para um processo de moldação por injeção, é necessário aplicar pressão no fundido até ao momento da solidificação do ataque. Caso isso não aconteça, ou a peça estará sub-compactada (resultando em defeitos no produto), ou a pressão sobre o plástico fundido na cavidade seja de tal ordem que provoque que o mesmo flua no sentido inverso, resultando também numa peça pouco compactada.

Procedimento para a determinação da pressão de compactação:

- Definir os parâmetros de injeção ótimos, obtidos nas etapas anteriores;
- Definir a pressão de compactação em 50% da pressão de injeção registada aquando da comutação;
- Aumentar a pressão de compactação em passos de 5% do pico de pressão de injeção;
- Registar os valores obtidos;
- Obter o gráfico que relaciona o valor da almofada com a pressão de compactação adotada.

Esta etapa permitiu identificar o tempo de compactação ideal para a peça em questão. Este tempo encontrado garante que enquanto exercermos a pressão de compactação, a peça está a ser gradualmente moldada, sem que haja retorno do plástico fundido.

4. CASOS DE ESTUDO

Revisto o procedimento experimental adotado ao longo deste projeto, segue-se a apresentação dos três casos que foram alvo de estudo. Será feita uma breve descrição dos produtos em questão, contemplando as características gerais dos materiais e máquinas usadas para o estudo.

4.1 Caso 1: Lente transparente

Tabela 1: Caraterísticas gerais para o caso 1

Identificação de projeto		
Cliente	Renault	
Projeto	1391	
Descrição da peça	Lente transparente	
Numero do molde	ST0311	
Identificação da matéria prima		
Material	PMMA (Acrílico)	
Fornecedor	EVONIK	
Nota:	A ficha relativa a esta matéria prima, provinda do fornecedor, está presente no Anexo I desta dissertação.	
Identificação da máquina de injeção		
Marca	Zhafir	
Modelo	Zeres ZE1500 II / 300	
Tipo	Elétrica	
Volume máximo de injeção (cm_3)	147	
Fuso/Câmara	Diâmetro (mm)	36
	Curso máximo (mm)	150
Pressão máxima de injeção (bar)	2000	
Rácio de intensificação	Não aplicável (Máquina elétrica)	
Força de fecho (Ton)	150	



Figura 16: Lente transparente



Figura 17: Zhafir ZE 1500

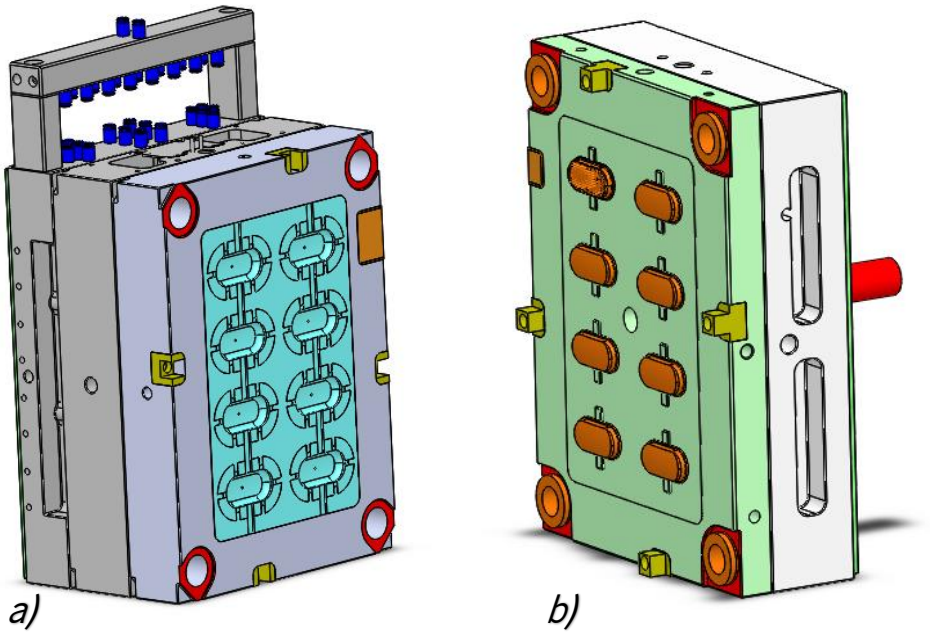


Figura 18: a) Parte fixa do molde da lente transparente, b) Parte móvel do molde da lente transparente

4.2 Caso 2: Guia de luz

Tabela 2: Características gerais para o caso

Identificação de projeto		
Cliente	Valeo	
Projeto	VL027	
Descrição da peça	Guia de luz	
Número do molde	ST0287	
Identificação da matéria prima		
Material	PMMA (Acrílico)	
Fornecedor	EVONIK	
Nota:	A ficha relativa a esta matéria prima, provinda do fornecedor, está presente no Anexo I desta dissertação.	
Identificação da máquina de injeção		
Marca	Engel	
Modelo	ES 200 H80V/50HL-2F	
Tipo	Hidráulica	
Volume máximo de injeção (cm_3)	70	
Fuso/Câmara	Diâmetro (mm)	25
	Curso máximo (mm)	200
Pressão máxima de injeção (bar)	150	
Rácio de intensificação (Pressão especifica/Pressão hidráulica)	10.3	
Força de fecho (Ton)	50	



Figura 19: a) Guia de luz esquerdo, b) Guia de luz direito



Figura 20: Engel ES 200/50 HL

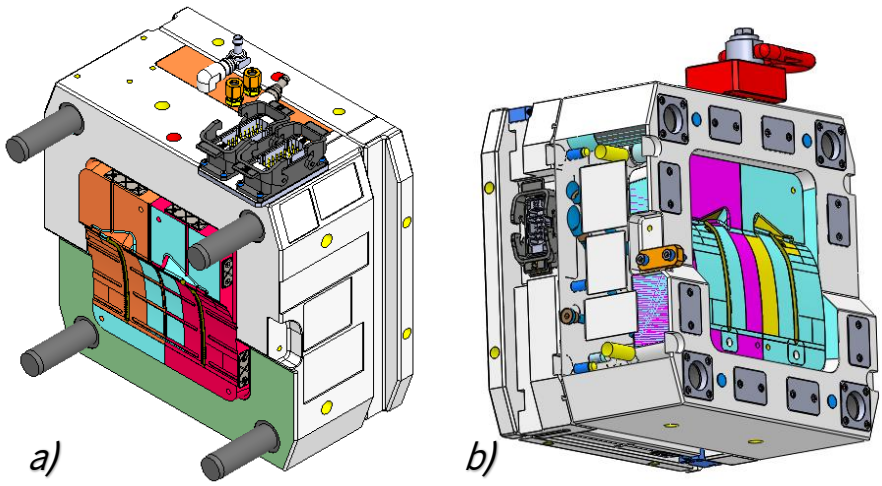


Figura 21: a) Parte fixa do molde do guia de luz, b) Parte móvel do molde do guia de luz

4.3 Caso 3: Suporte

Tabela 3: Características gerais para o caso 3

Identificação de projeto		
Cliente	Magna	
Projeto	MG001	
Descrição da peça	Suporte	
Numero do molde	ST0392	
Identificação da matéria prima		
Material	ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno)	
Fornecedor	STYROLUTION	
Nota:	A ficha relativa a esta matéria prima, provinda do fornecedor, está presente no Anexo II desta dissertação.	
Identificação da máquina de injeção		
Marca	Engel	
Modelo	ES 650/125 HLST	
Tipo	Hidráulica	
Volume máximo de injeção (cm_3)	250	
Fuso/Câmara	Diâmetro (mm)	40
	Curso máximo (mm)	350
Pressão máxima de injeção (bar)	170	
Rácio de intensificação (Pressão especifica/Pressão hidráulica)	10.3	
Força de fecho (Ton)	125	



Figura 22: a) Suporte esquerdo, b) Suporte direito



Figura 23: Engel ES 650/125 HL

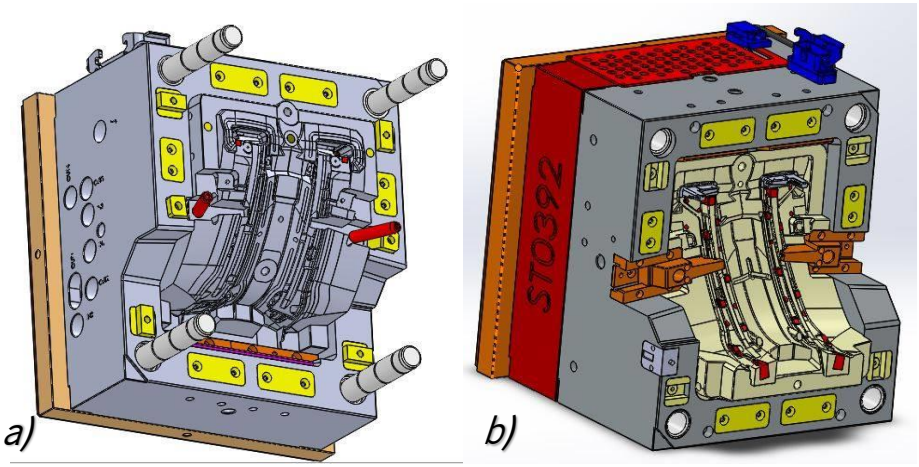


Figura 24: a) Parte fixa do molde do suporte, b) Parte móvel do molde do suporte

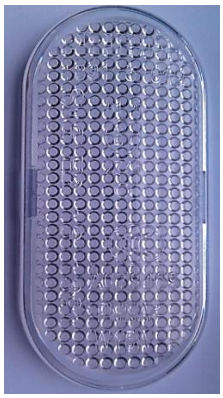
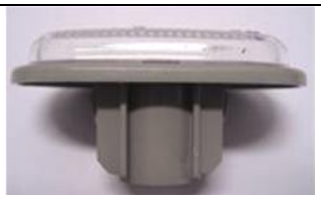
5. Apresentação e Discussão dos Resultados Obtidos

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada etapa do procedimento experimental, descrito no capítulo 3. Após a apresentação do estudo realizado, serão identificados os parâmetros de injeção ótimos a serem usados posteriormente em contexto produtivo.

5.1 Caso 1: Lente transparente

O primeiro caso apresentado trata-se de uma lente transparente que será posteriormente montada em conjunto com um suporte preto. A montagem final culminará num pisca convencional para um automóvel. Importante referir também que o molde característico deste produto possui oito cavidades. No sentido de proporcionar um melhor entendimento da peça em questão e da sua posterior montagem, na Tabela 4, estão representados os suportes existentes, assim como a sua montagem com a lente transparente.

Tabela 4: Representação dos componentes e a sua montagem no caso1

Lente transparente	Suporte	Montagem final
 Figura25: Lente transparente	 Figura26: Suporte pequeno	 Figura27: Pisca pequeno
	 Figura28: Suporte largo	 Figura29: Pisca largo

Passaremos de seguida para a apresentação das características mais importantes a controlar na lente transparente e posteriormente a exposição e discussão dos resultados obtidos para cada etapa do estudo da otimização do processo de injeção. Mais uma vez relembrar que o estudo que será apresentado está de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3.

5.1.1 Características a controlar na lente transparente

Existem uma série de características, nomeadamente certas propriedades e dimensões, que necessitam de ser controladas para assegurar o bom funcionamento do produto. Assim, e tendo em conta as especificações que as caracterizam, as peças em estudo têm que possuir uma série de atributos para que sejam consideradas aptas para o cliente. Na Tabela 5 está representada a inspeção visual das peças para assegurar que as mesmas estejam ausentes de defeitos característicos do processo de moldação por injeção. A nível de controlo dimensional, o que será necessário ter em conta está presente na Tabela 6. Por último e tendo em conta que esta é uma peça que sofrerá operações de montagem posteriores à injeção, é necessário realizar uma série de testes funcionais que estão descritos na Tabela 7.

Tabela 5: Inspeção visual da lente transparente

Inspeção visual		
Características a controlar	**Frequência**	**Amostra**
Falta de matéria	7/8/9/10	2 injeções
Rebarbas	7/8/9/10	2 injeções
Bolhas de ar	7/8/9/10	2 injeções
Pintas pretas ou contaminações significativas	7/8/9/10	2 injeções
Queimados	7/8/9/10	2 injeções
Raiados	7/8/9/10	2 injeções
Manchas	7/8/9/10	2 injeções
Lentes estaladas ou deformadas	7/8/9/10	2 injeções
Linhas de fluxo	7/8/9/10	2 injeções
Chupos	7/8/9/10	2 injeções
Riscos	7/8/9/10	2 injeções
Pontos de injeção salientes	7/8/9/10	2 injeções
Verificar se as marcações nas peças estão corretas	7/8/9/10	2 injeções

Nota: Os códigos representados na coluna da frequência têm como significado: no inicio de cada turno (código 7); no fim do turno (código 8); no inicio de série (código 9) e no fim de série (código 10)

Tabela 6: Controlo dimensional da lente transparente

Controlo dimensional

Dimensão crítica D1 (Ver Figura 30)	Mínimo	Máximo	Unidade	Equipamento	Frequência	Amostra
27.6±0.2	27.40	27.80	mm	Paquímetro	7/8/9/10	2 injeções

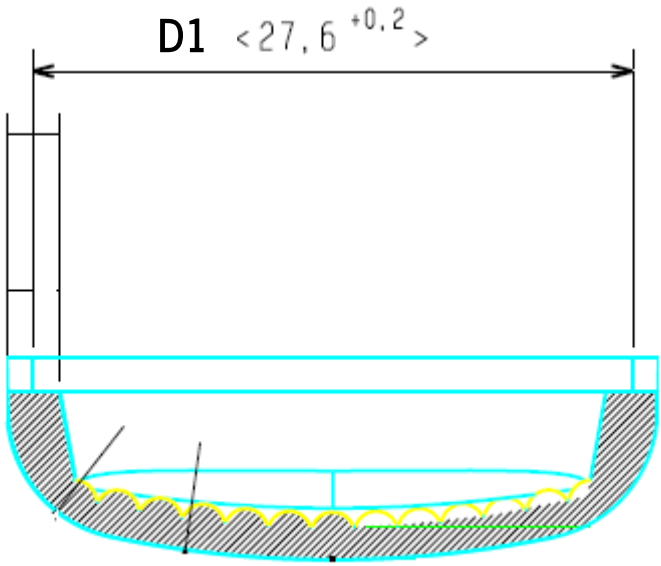


Figura30: Representação da dimensão crítica (D1) a controlar para a lente transparente (Vista lateral)

Tabela 7: Testes funcionais da lente transparente

Testes Funcionais

Descrição das operações	Frequência	Amostra
Encaixes nas contrapartidas	7/9/10	2 injeções
Soldadura e teste de estanquidade	7/9/10	2 injeções
Testar a dureza do ponto de injeção	7/9/10	2 injeções

Todas estas características foram analisadas e controladas ao longo do processo experimental. Em especial, a dimensão crítica representada na Figura 30, foi a propriedade escolhida para a etapa 5 do estudo do tempo de arrefecimento.

5.1.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção – Estudo Reológico

Para esta etapa, o procedimento utilizado está descrito no capítulo 3. Primeiramente, foi introduzido um conjunto de temperaturas de acordo com o indicado pelo fornecedor da matéria prima. A temperatura do termorregulador foi definida para os 40 ºC, valor inferior ao indicado pelo fornecedor (60 a 90 ºC), mas devido à dificuldade na extração das peças, foi definido um valor mais baixo. O tempo de arrefecimento foi definido nos 15 segundos. Na Tabela 8, estão representados os parâmetros adotados para este estudo.

Tabela 8 Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para a lente transparente

Descrição do projeto					
Número de cavidades	8+8				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	1500				
Pressão de injeção (bar)	2000				
Tempo de arrefecimento (s)	15				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	235	230	225	220
Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	3				
Temperatura do termorregulador (ºC)	40				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	240
	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	-

Posteriormente, e de forma a obtermos uma moldação com aproximadamente 95% do peso final das peças, foi definida uma dosagem de 40 mm, com um ponto de comutação definido nos 10 mm do curso do parafuso. Assim, e seguindo os restantes passos, foi encontrada a curva da viscosidade para este caso de estudo (ver Figura 31).

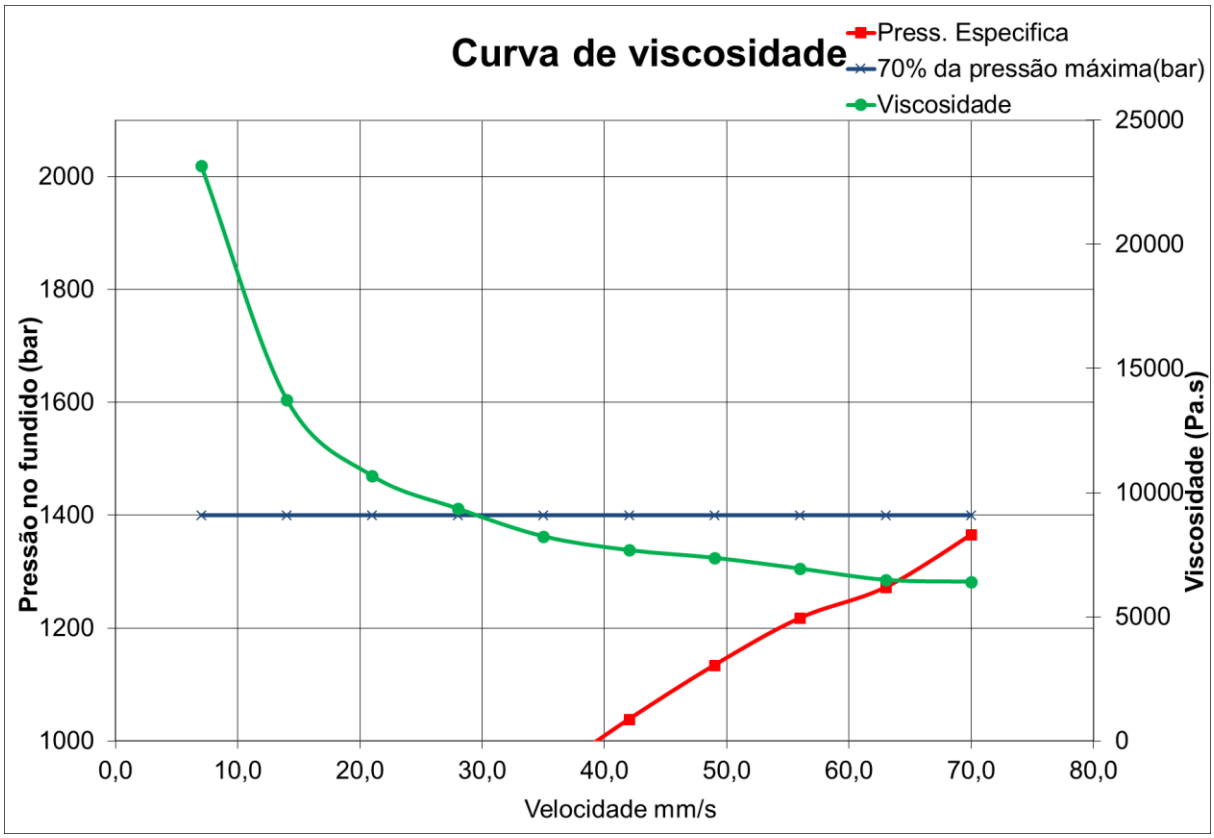


Figura 31: Curva da viscosidade para a lente transparente

Atendendo ao fato de procurarmos um intervalo de velocidades que manifeste uma variação mínima da viscosidade do material, teremos que procurar a zona do gráfico onde a curva da viscosidade se apresenta aproximadamente constante. Assim, seremos capazes de garantir uma viscosidade uniforme ao longo do escoamento e que se traduza num enchimento progressivo e constante ao longo do molde. Dito isto, e segundo o gráfico apresentado, a velocidade de injeção ideal para este caso estará compreendida entre os 65 e 70 mm/s. No sentido de garantir um estudo fidedigno, a velocidade foi definida nos 65 mm/s para as restantes etapas do procedimento. Verificou-se também que a velocidades mais reduzidas o desbalanceamento nas várias cavidades acentuava-se.

Sob a perspetiva de superarmos os 1400 bar de pressão máxima admissível (70% da pressão máxima da máquina), optou-se por não realizar estudos a velocidades de injeção superiores a 70 mm/s. Assim, para além da velocidade, foi definida uma pressão de injeção de 1400 bar.

5.1.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades

Na Tabela 9, estão presentes um conjunto de valores relativos aos parâmetros de injeção utilizados nesta etapa, sendo que a velocidade injeção encontrada no estudo reológico, foi adotada também nesta fase.

Tabela 9: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 2 para a lente transparente

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	40
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Tempo de arrefecimento (s)	15
Velocidade de injeção (mm/s)	65

Sendo este um molde com oito cavidades, esta etapa apresenta-se como sendo crucial para a validação do estudo em questão. Assim, e de acordo com o procedimento descrito no capitulo 3, foram realizadas três moldações e posteriormente foi feito o registo da média do peso das peças em cada cavidade. Os resultados obtidos estão presentes no gráfico da Figura 32.

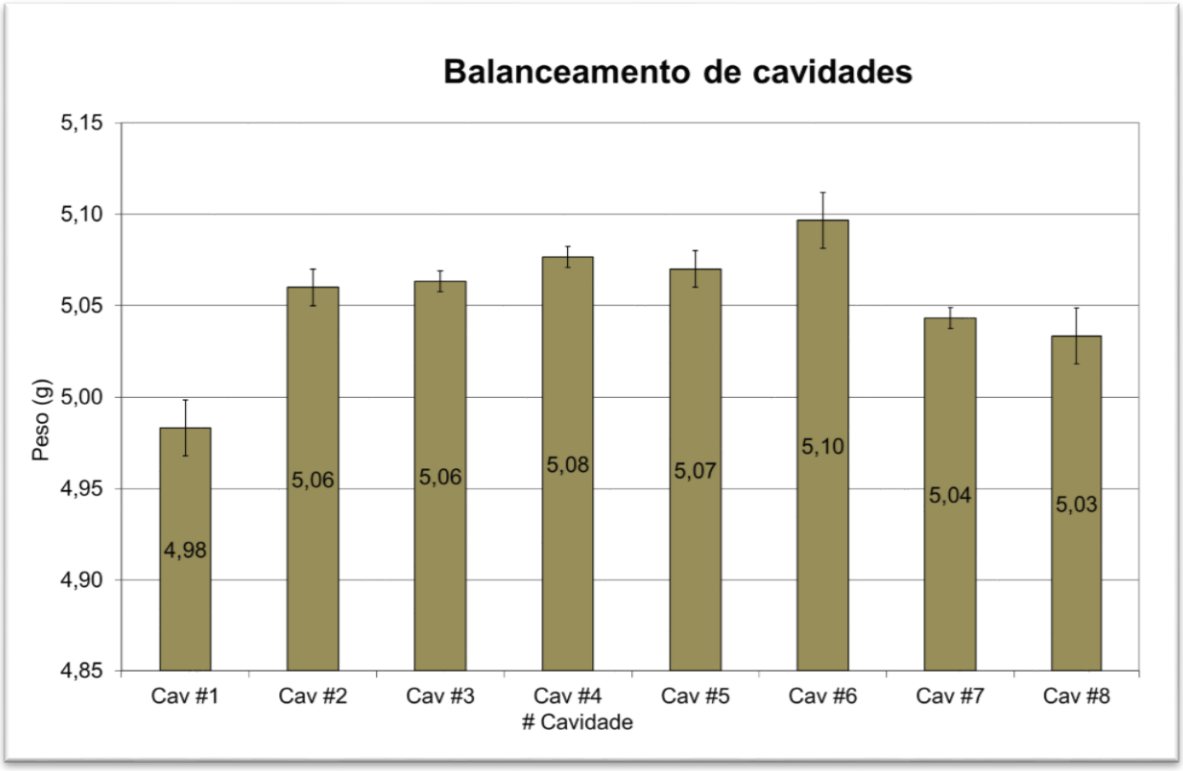


Figura 32: Estudo de balanceamento de cavidades para a lente transparente

Através da análise do gráfico, é possível observar uma certa disparidade no peso das peças entre as várias cavidades (cerca de 0.12 gramas entre as cavidades mais desfasadas). Uma das razões mais importantes, trata-se naturalmente do fato de possuirmos um elevado número de peças por moldação e daí uma dificuldade acrescida no enchimento total e uniforme das peças.

A análise terá que ter em conta o rigor nas tolerâncias do produto, ou seja, visto que o peso das peças não se apresenta como sendo uma característica crítica, poderemos assumir esta diferença observável

no gráfico da Figura 32. Além disso, prevê-se que com a aplicação da pressão de compactação, a diferença observável no gráfico possa ser atenuada.

Outro dos aspetos a ter em conta nesta etapa é a morfologia do material utilizado. O estudo de balanceamento de cavidades fornece ilações relativamente ao controlo dimensional das peças. Um desbalanceamento entre cavidades mais acentuado, poderá traduzir-se numa variação mais significativa a nível dimensional. Sendo o PMMA um polímero amorfo, a percentagem expectável de contração não é tão acentuada como num material semi-cristalino, ou seja, as variações dimensionais de cavidade para cavidade não serão tão acentuadas.

5.1.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão

No sentido de conseguirmos obter a queda de pressão nas várias fases do enchimento da peça, fez-se variar o ponto de comutação, ou seja, a quantidade de material injetado que variou significativamente. Na Tabela 10, estão representados os valores de dosagem e do ponto de comutação adotados nesta etapa. Todas as outras variáveis mantiveram-se iguais às das etapas anteriores.

Tabela 10: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para a lente transparente

Zona	Dosagem (mm)	Ponto de comutação (mm)
Bico de injeção	50	49
Canal quente	50	48
Peça cheia	50	10

Assim, foi obtido o gráfico da queda de pressão para este produto que está representado na Figura 33.

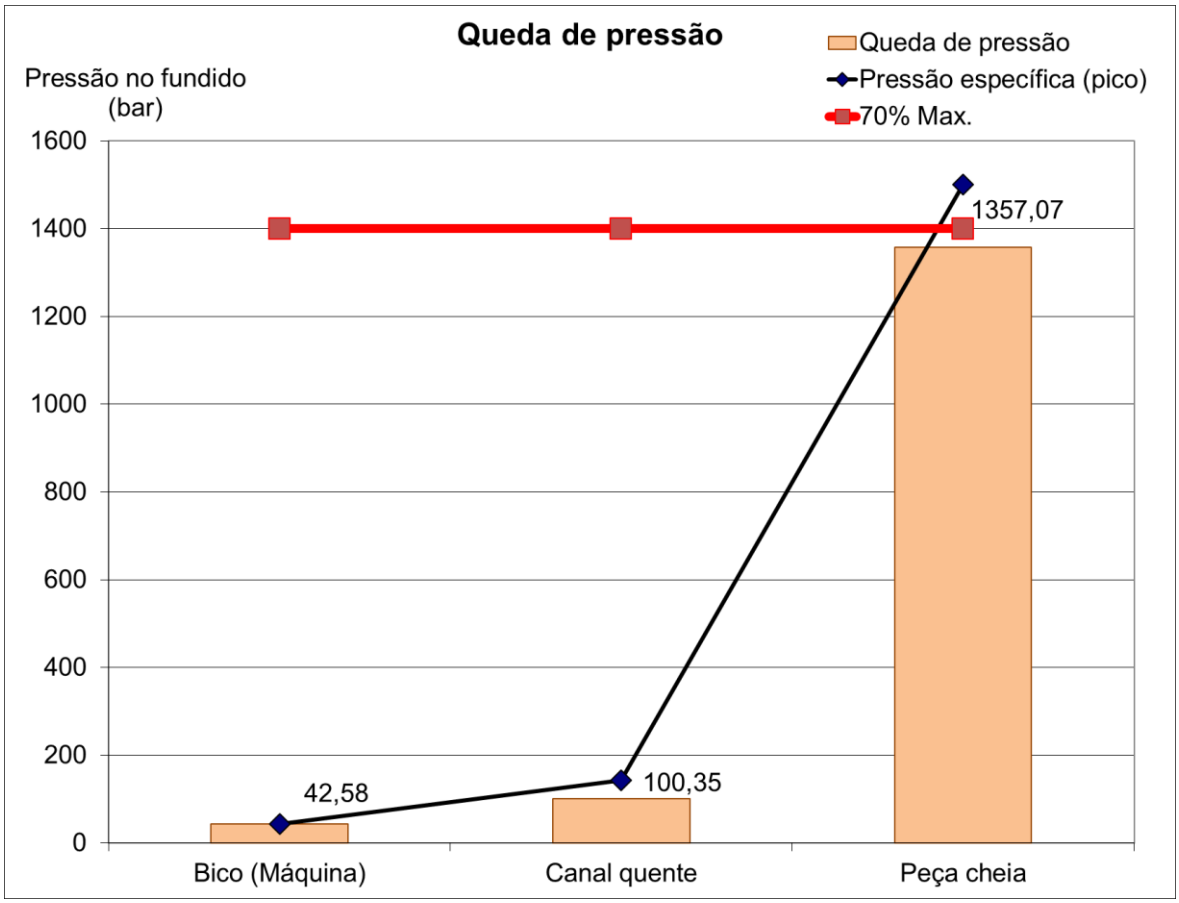


Figura 33: Estudo da queda de pressão para a lente transparente

Visto este ser um molde de canal quente, com ataque direto à peça, a queda de pressão é pouco significativa ao longo do canal de alimentação. Por outro lado, e como seria expectável, a queda de pressão é bastante mais acentuada quando procedemos à injeção da peça completa. Mesmo considerando o valor de queda de pressão máxima obtida no gráfico (1357.07 bar), este é ligeiramente inferior aos 70% da pressão máxima de injeção admissível (1400 bar). Assim poderemos considerar que se trata de um processo corretamente pensado.

5.1.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação

Nesta etapa, as variáveis de processo utilizadas foram as mesmas aquelas usadas na etapa 2. No entanto, a pressão de compactação usada foi de 956 bar (70% do pico de pressão de injeção registada na comutação que foi de 1365 bar). Assim, na Figura 34 está representado o gráfico que resume o estudo feito para o tempo de compactação. O estudo caracterizou-se por um aumento gradual do tempo de compactação. O peso das peças foi medido para cada tempo de compactação definido, sendo este de 0.5 segundos inicialmente, até aos 3 segundos (sempre a passos de 0.5 segundos).

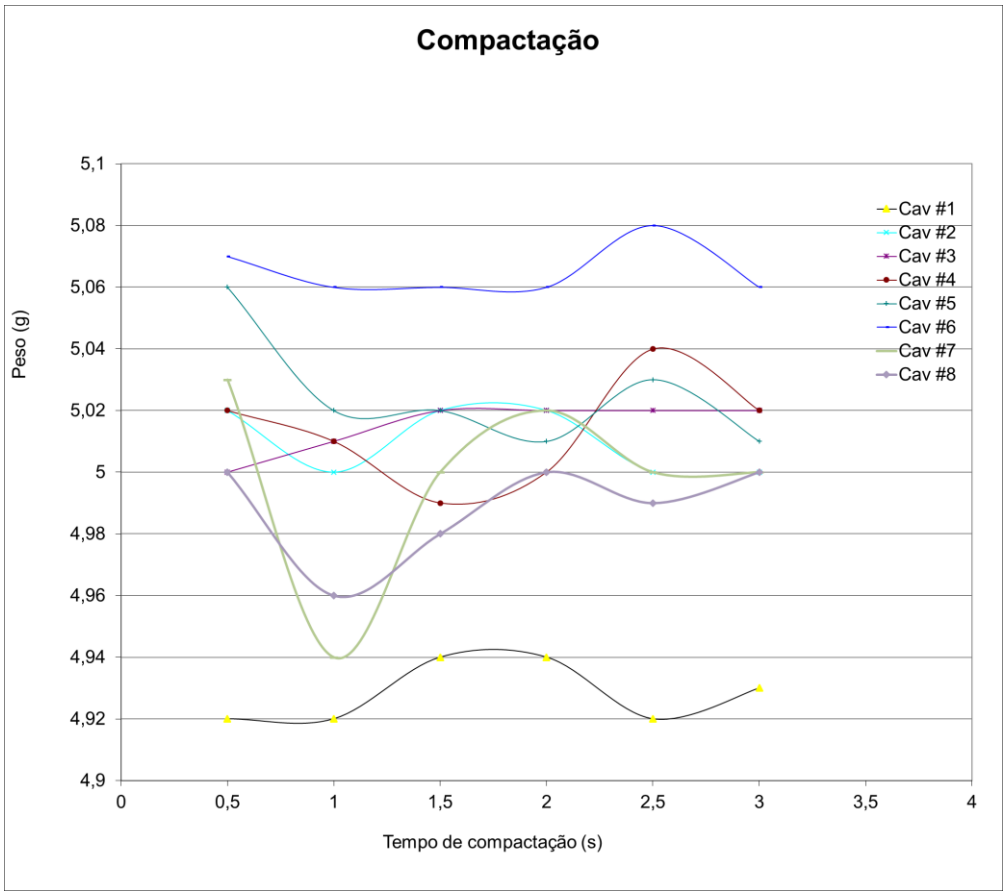


Figura 34: Estudo do tempo de compactação para a lente transparente

Como é possível observar no gráfico, as alterações promovidas não geraram um aumento significativo no peso das peças. Analisando em concreto cada uma das cavidades, a variação no peso é pouco considerável para tempos de compactação diferentes. Estes resultados podem sugerir um aumento ao ponto de comutação, ou seja, fornecer menos material durante a fase de injeção, e fazer assim com que o tempo e a pressão de compactação possam contribuir também para o enchimento da peça. No entanto, visto que o ponto de comutação utilizado para esta etapa, juntamente com 0.5 segundos de compactação produzem peças dentro das especificações, decidiu-se optar pela não alteração do ponto de comutação ou até mesmo à dosagem. Sendo assim, foi definido um tempo de compactação nos 0.5 segundos.

5.1.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento

Na Tabela 11, estão presentes os valores das variáveis que provêm das etapas anteriores e que foram utilizadas no estudo do tempo de arrefecimento para a lente transparente.

Tabela 11: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para a lente transparente

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	40
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Velocidade de injeção (mm/s)	65
Tempo de compactação (s)	0.5

Esta etapa procurou averiguar a influência do tempo de arrefecimento na variação da dimensão crítica D1, esta previamente definida com base nos efeitos de contração do PMMA (0.1 a 0.4%) (7). Os dados apresentados no gráfico da Figura 35 foram obtidos para quatro tempos de arrefecimento diferentes, sendo eles 5, 10, 15 e 20 segundos.

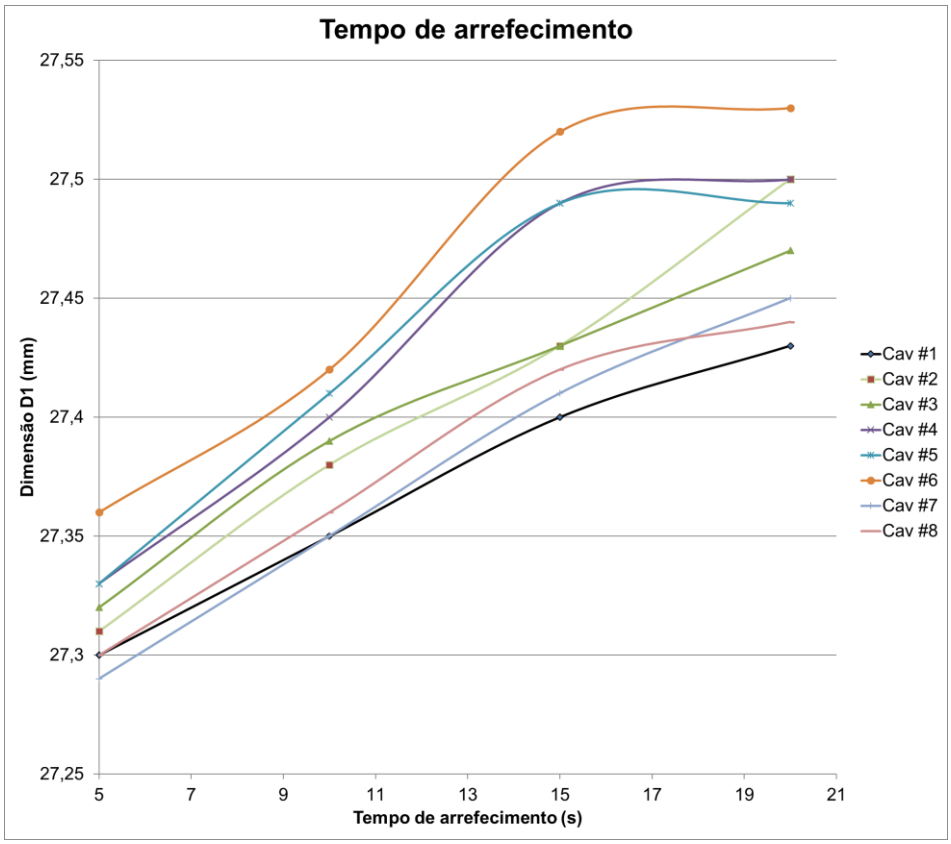


Figura 35: Estudo do tempo de arrefecimento para o lente transparente

Através da análise do gráfico da Figura 35, é possível observar que o tempo de arrefecimento possui uma influência significativa na dimensão D1 e em todas as cavidades. Sabendo que este valor terá que estar compreendido entre 27.40 e 27.80 milímetros para que a peça esteja dentro das especificações, apenas com tempos de arrefecimento superiores a 15 segundos é que isso será possível. No entanto,

para garantir que as peças estejam sempre de acordo com as características, o tempo de arrefecimento foi definido nos 20 segundos, atendendo aos limites definidos para D1.

5.1.7 Etapa 6: Validação da almofada

Na Tabela 12 estão representados o conjunto de parâmetros usados nesta fase.

Tabela 12: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para a lente transparente

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	40
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Velocidade de injeção (mm/s)	65
Tempo de compactação (s)	0.5
Tempo de arrefecimento (s)	20

Para o presente estudo, o parâmetro crítico a ter em conta será a pressão de compactação, mantendo todos os outros parâmetros utilizados nas etapas anteriores. De acordo com o procedimento descrito no capítulo 3, a pressão com que inicia este estudo, será de 50% da pressão registada na comutação. Sendo assim, a mesma foi definida nos 683 bar. O estudo da variação da almofada encontra-se representado no gráfico da Figura 36.

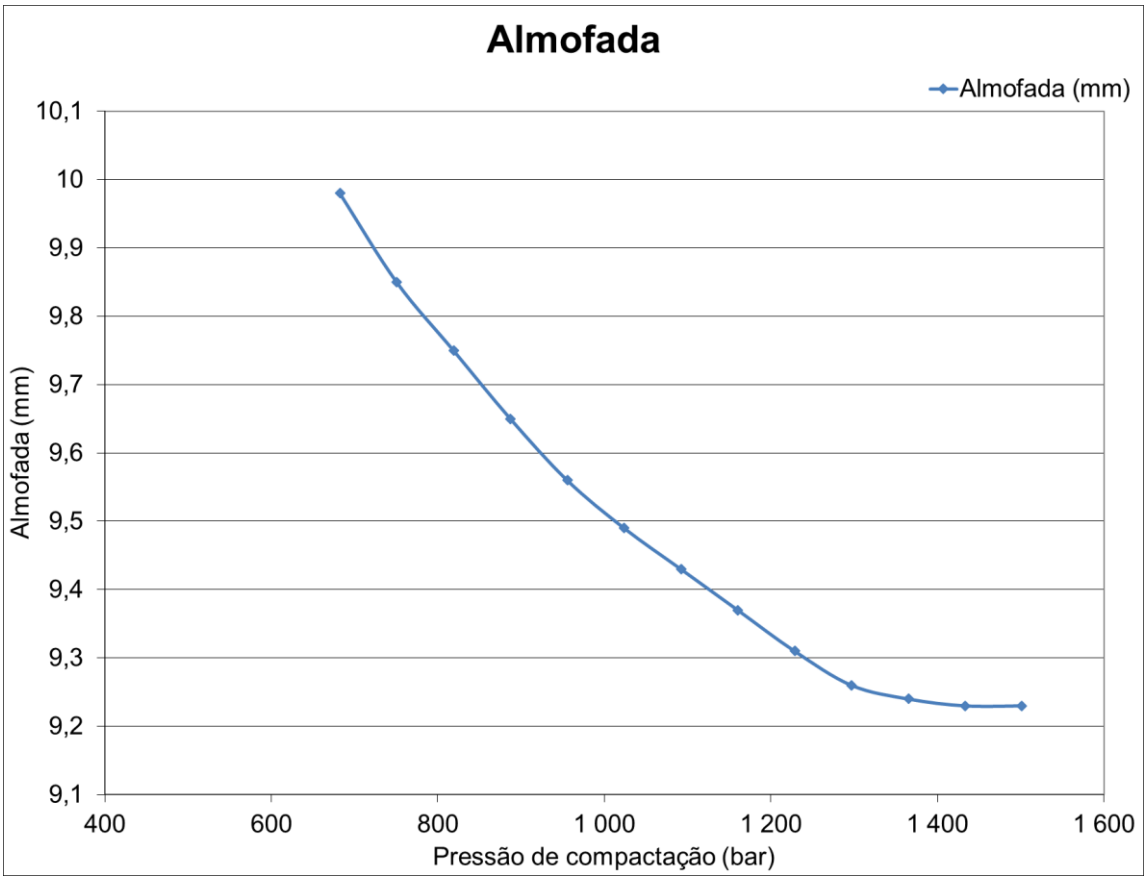


Figura 36: Estudo da variação da almofada para a lente transparente

À semelhança do que foi dito no procedimento do capítulo 3, esta etapa é vital para assegurarmos um processo estável e robusto. A estabilidade da almofada apresenta-se como sendo um dos indicadores de um processo consistente. Como referido na etapa do estudo do tempo de compactação, a pressão específica adotada não deve ser superior a 1400 bar (pressão admissível para a máquina de injeção). Assim, e para garantir a consistência também nas moldações, a pressão de compactação adotada foi então de 1400 bar.

5.1.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 1

Uma vez concluído o nosso estudo de otimização do processo de injeção para lente transparente, irá ser feita uma revisão dos parâmetros ideias que foram alvo de estudo nas etapas anteriores. Essa revisão está compreendida na Tabela 13.

Tabela 13: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 1

Descrição do projeto					
Número de cavidades	8+8				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	1500				
Pressão de injeção (bar)	1400				
Tempo de arrefecimento (s)	20				
Dosagem	40				
Ponto de comutação (mm)	10				
Velocidade de injeção (mm/s)	65				
Tempo de compactação (s)	0.5				
Pressão de compactação (bar)	1400				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	235	230	225	220
Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	3				
Temperatura do termorregulador (ºC)	40				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	240
	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	-

O tempo de ciclo associado a este processo ficou nos 20.6 segundos, representando uma melhoria em relação ao tempo previsto (25 segundos). Este processo será capaz de produzir com qualidade consistente e estará imune a pequenas variações naturais do contexto industrial (diferenças entre lotes de matéria ou de pequenas alterações nas temperaturas reais).

5.2 Caso 2: Guia de luz

O segundo caso apresentado trata-se de um guia de luz que será incorporado no retrovisor do automóvel. O molde produz duas peças em simultâneo, uma direita e outra esquerda. Naturalmente, a correta passagem de luz ao longo da peça apresenta-se como sendo um fator crítico a ter em conta na produção da mesma. Para além disso, o possível empeno da peça após a sua extração é também uma das características importantes neste caso.



Figura37: Representação do guia de luz com indicação do ponto de injeção

Passa-se de seguida para a apresentação das características a controlar no caso do guia de luz e posteriormente seguir-se-á a aplicação do procedimento descrito no capítulo 3.

5.2.1 Características a controlar no guia de luz

À semelhança do primeiro caso de estudo, também aqui existe um conjunto de propriedades e dimensões a ter em conta na produção das peças. Assim, a inspeção visual para o guia de luz está presente na Tabela 14, o controlo dimensional está compreendido na Tabela 15 e por último os testes funcionais que se encontram descritos na Tabela 16.

Tabela 14: Inspeção visual do guia de luz

Inspeção visual

Características a controlar	Frequência	Amostra
Falta de matéria	7/8/9/10	2 injeções
Bolhas de ar	7/8/9/10	2 injeções
Pintas pretas ou contaminações significativas	7/8/9/10	2 injeções
Raiados	7/8/9/10	2 injeções
Manchas	7/8/9/10	2 injeções
Peças estaladas ou deformadas	7/8/9/10	2 injeções
Linhas de fluxo	7/8/9/10	2 injeções
Chupos	7/8/9/10	2 injeções
Riscos	7/8/9/10	2 injeções
Peças leitosas	7/8/9/10	2 injeções
Verificar se as marcações nas peças estão corretas	7/8/9/10	2 injeções

Nota: Os códigos representados na coluna da frequência têm como significado: no inicio de cada turno (código 7); no fim do turno (código 8); no inicio de série (código 9) e no fim de série (código 10)

Tabela 15: Controlo dimensional do guia de luz

Controlo dimensional

Peso	Mínimo	Máximo	Unidade	Equipamento	Frequência	Amostra
4.22	4.12	4.32	mm	Balança	7/8/9/10	2 injeções

Tabela 16: Testes funcionais do guia de luz

Testes Funcionais

Descrição das operações	Frequência	Amostra
Verificar no biómetro (Figura 38)	7/8/9/10	2 injeções
Verificar a deformação no calibre (Figura 39)	7/8/9/10	2 injeções

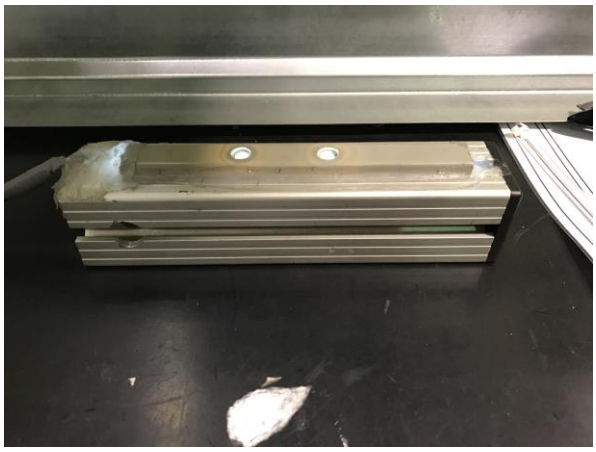


Figura 38: Biómetro utilizado num dos testes funcionais do guia de luz



Figura 39: Calibre utilizado num dos testes funcionais do guia de luz

Mais uma vez, o conjunto de características apresentadas foi tido em conta durante o processo experimental. Em especial, na etapa do tempo de arrefecimento, o calibre representado na Figura 39 foi utilizado no sentido de verificar o empeno da peça e assim oferecer fidelidade ao estudo.

5.2.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção

Para esta etapa, o procedimento utilizado foi o descrito no capítulo 3. Inicialmente, foi definido um conjunto de temperaturas de acordo com o indicado pelo fornecedor da matéria prima. A temperatura do termorregulador foi definida para os 75 ºC. O tempo de arrefecimento foi definido nos 20 segundos,

valor que permitia a correta extração das peças moldadas. Na Tabela 17, estão representados os parâmetros principais usados nesta etapa.

Tabela 17: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para o guia de luz

Descrição do projeto					
Número de cavidades	1+1				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	500				
Pressão de injeção no fundido (bar)	1545				
Tempo de arrefecimento (s)	20				
Pressão de injeção (bar)	150 (Hidráulica)				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	
	225	220	215	210	
Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	3				
Temperatura do termorregulador (ºC)	75				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	240
	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	-	-	-

Posteriormente, e de forma a ser obtida uma moldação com aproximadamente 95% do peso final das peças, foi definida uma dosagem de 35 mm, com um ponto de comutação definido nos 16 mm do curso do fuso. Assim, foi possível obter a curva da viscosidade que se encontra representada no gráfico da Figura 40.

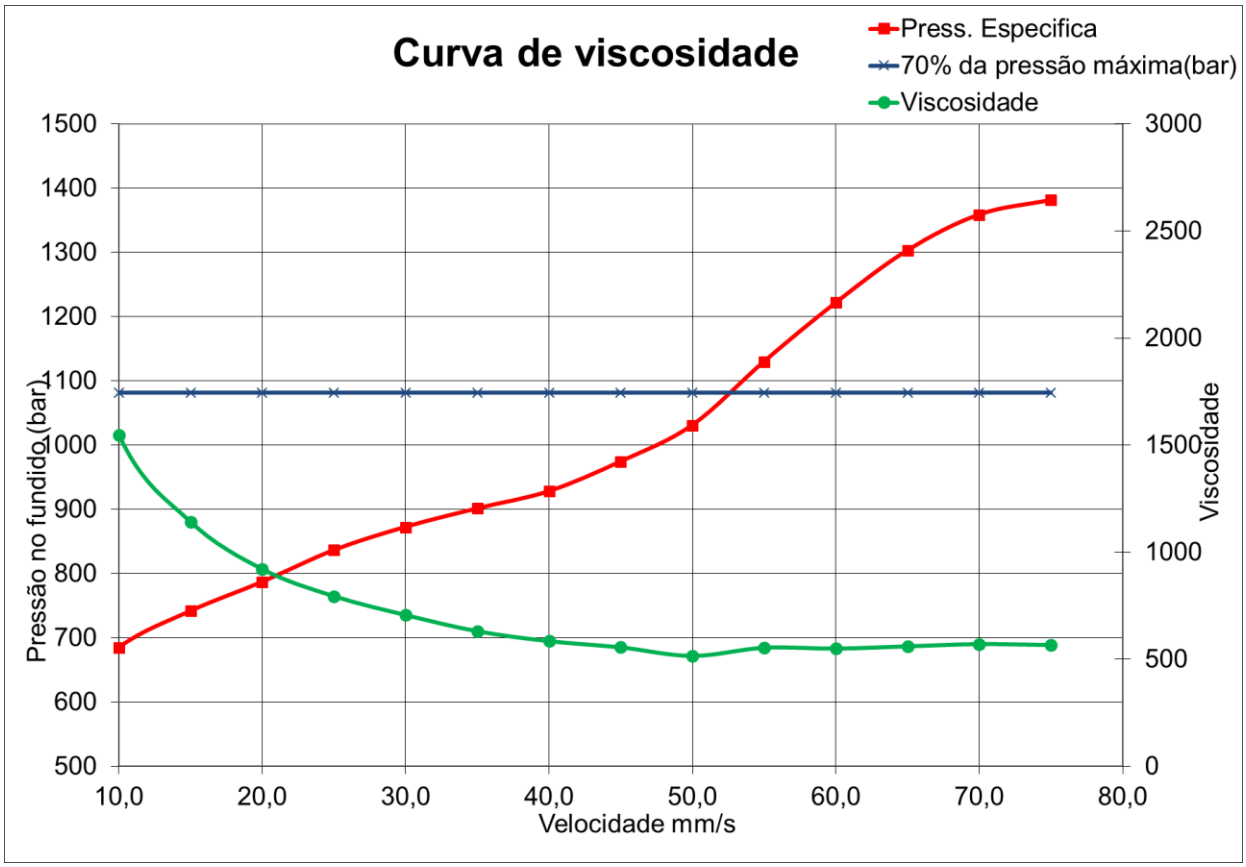


Figura 40: Curva da viscosidade para o guia de luz

Através da análise do gráfico acima representado, é possível observar que a partir de velocidades de injeção a rondar os 40 mm/s, a curva de viscosidade do material tende a estabilizar. No sentido de garantir consistência de moldação para moldação, é necessário procurarmos definir uma velocidade que se traduza numa viscosidade constante, caso a velocidade varie ligeiramente. Desta forma, o enchimento das peças será mais uniforme. É possível observar também que a partir de velocidades superiores a 50 mm/s, aproximamo-nos da pressão máxima de injeção admissível (1082 bar que representa 70% da pressão máxima da máquina). Assim, a velocidade de injeção ideal para este caso terá que estar compreendida entre 40 e 50 mm/s. Desta forma, decidiu-se adotar os 45 mm/s como a velocidade de injeção ideal.

Em relação á pressão de injeção no fundido, esta foi definida nos 1100 bar que convertendo para pressão hidráulica através do rácio de intensificação, ficou nos 107 bar aproximadamente.

5.2.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades

Na Tabela 18, estão presentes os valores dos parâmetros de injeção utilizados no estudo do balanceamento de cavidades. A velocidade de injeção usada nesta etapa proveio do estudo reológico realizado anteriormente.

Tabela 18: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 2 para o guia de luz

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	35
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	16
Tempo de arrefecimento (s)	15
Velocidade de injeção (mm/s)	45

De acordo com o procedimento descrito no capítulo 3, foram realizadas três moldações e registados os valores do peso das peças. Os dados obtidos estão descritos no gráfico da Figura 41.

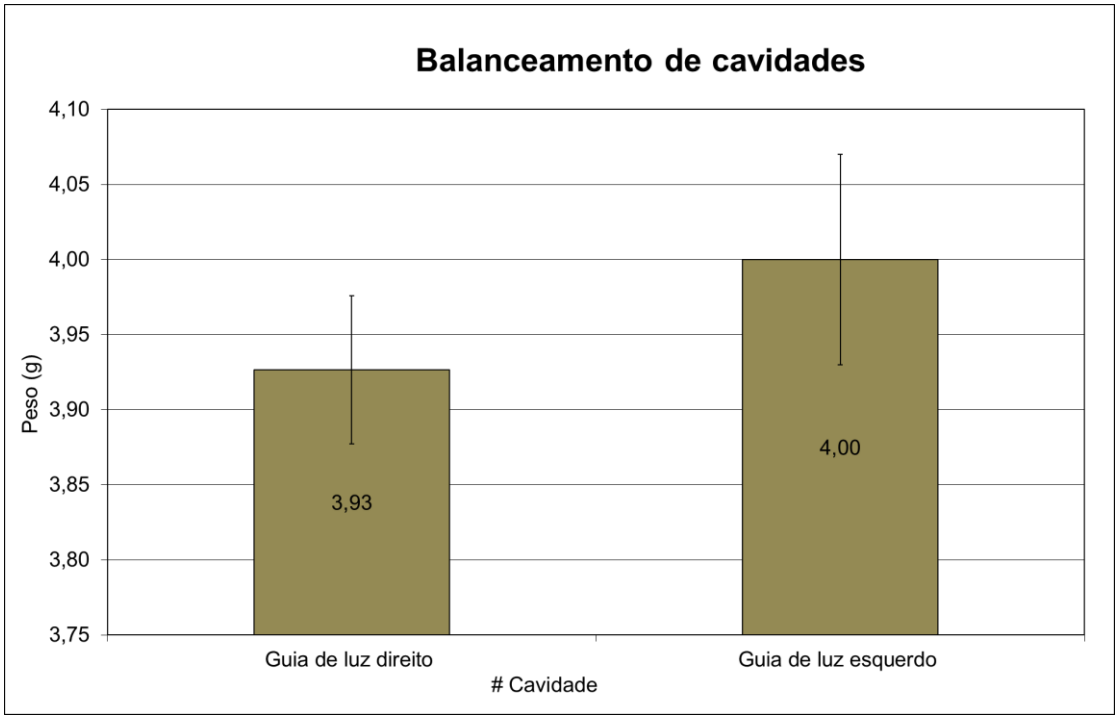


Figura 41: Estudo de balanceamento de cavidades para o guia de luz

Através da análise do gráfico, é possível verificar uma certa disparidade no valor do peso das peças entre cavidades (cerca de 0.07 gramas). Neste segundo caso de estudo, existe maior rigor nas tolerâncias atribuídas ao peso das peças. Assim, a diferença observável no gráfico terá que ser minimizada posteriormente com o auxílio da pressão de compactação.

5.2.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão

No caso do guia de luz, o estudo da queda de pressão contará com mais fases a serem tidas em conta, ou seja, já será possível obter resultados para o jito e o ataque da peça. Na Tabela 19 estão representados os valores de dosagem e do ponto de comutação adotados nesta etapa. Todas as outras variáveis mantiveram-se iguais ás usadas na etapa anterior.

Tabela 19: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para o guia de luz

Zona	Dosagem (mm)	Ponto de comutação (mm)
Bico de injeção	35	33
Canal quente	35	31
Jito	35	30
Ataque	35	29
Peça cheia	35	16

Dados estes valores, foi obtido o gráfico da queda de pressão para o caso do guia de luz que está representado na Figura 42.

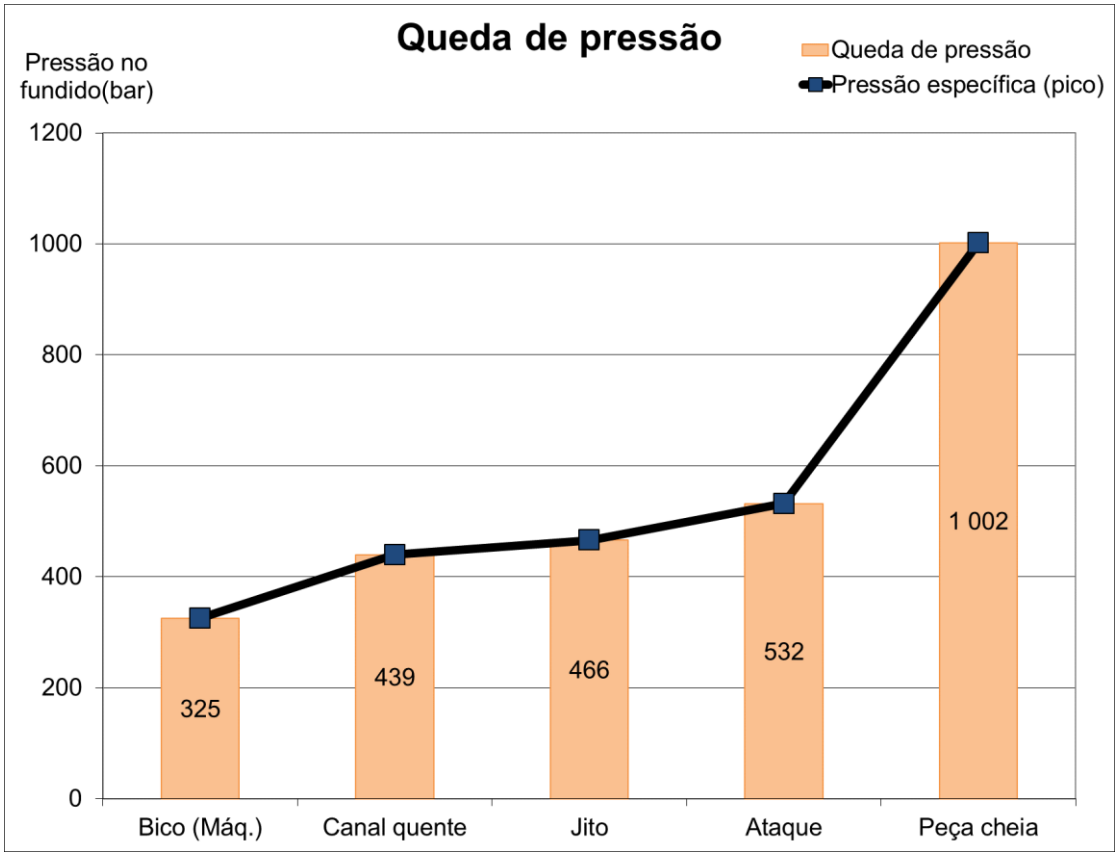


Figura 42: Estudo da queda de pressão para o guia de luz

Tendo em conta que o valor máximo de queda de pressão registada foi de 1002 bar, esta não excede os 70% da pressão máxima admissível (1085 bar). Outros dos fatores a ter em conta neste caso é o fato de estarmos perante um molde de canal quente com jito, ou seja, as zonas onde o fundido poderá perder pressão aumentam relativamente ao caso da lente transparente.

5.2.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação

De acordo com os mesmos parâmetros do processo adotados na etapa 2, procedeu-se à realização do estudo do tempo de compactação. No entanto, a pressão de compactação usada foi de 682 bar (70% do pico de pressão de injeção registada na comutação que foi de 974 bar). Os dados obtidos para esta etapa, encontram-se representados no gráfico da Figura 43.

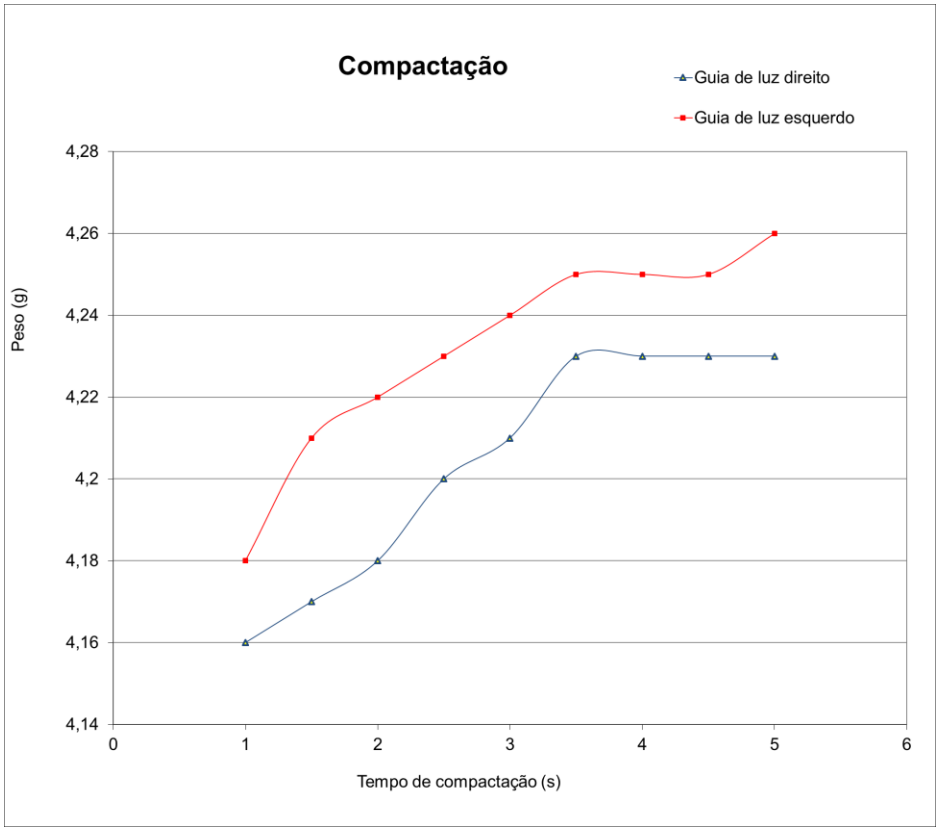


Figura 43: Estudo do tempo de compactação para o guia de luz

Através de uma análise do gráfico, é possível observar que o aumento do tempo de compactação é diretamente proporcional ao aumento do peso das peças. Assim, e tendo em conta as tolerâncias definidas para este produto, foi adotado um tempo de compactação de 3.5 segundos pois assegura que as moldações se encontram de acordo com o pretendido. Este tempo, assegura que as duas peças se encontrão dentro das cotas. Outra das análises possíveis a estes resultados é a solidificação do ataque,

pois quando este arrefece até uma temperatura que não permita mais a entrada de material, o peso das peças não irá sofrer alterações significativas.

5.2.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento

Para esta etapa, o conjunto de variáveis adotadas estão descritas na Tabela 20.

Tabela 20: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para o guia de luz

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	35
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	16
Velocidade de injeção (mm/s)	45
Tempo de compactação (s)	3.5

Considerando o calibre utilizado nesta etapa (Figura 44), este não permite fazer medições mesuráveis e portanto, não será apresentado gráfico nesta fase. Quando o guia de luz é colocado no calibre, a barra metálica na parte superior desliza horizontalmente e se a mesma passar sem tocar na peça, estamos perante um teste positivo. Caso a barra toque na peça, já será um teste negativo. Sendo assim, foram realizados quatro ensaios com tempos de arrefecimento distintos, sendo eles 10, 15, 20 e 25 segundos. Apenas com 25 segundos de tempo de arrefecimento é que obtemos um teste positivo, sendo esse o valor definido para o arrefecimento das peças.



Figura 44: Calibre usado para a etapa 5 do guia de luz

5.2.7 Etapa 6: Validação da almofada

Na Tabela 21, estão representados o conjunto de parâmetros usados nesta etapa.

Tabela 21: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para o guia de luz

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	35
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	16
Velocidade de injeção (mm/s)	45
Tempo de compactação (s)	3.5
Tempo de arrefecimento (s)	25

No sentido de se encontrar o valor de pressão de compactação ideal para o caso do guia de luz, o nosso estudo inicia-se com uma pressão inicial de cerca de 487 bar (50% do pico de pressão de injeção registada na comutação). O estudo da variação da almofada está presente no gráfico da Figura 45.

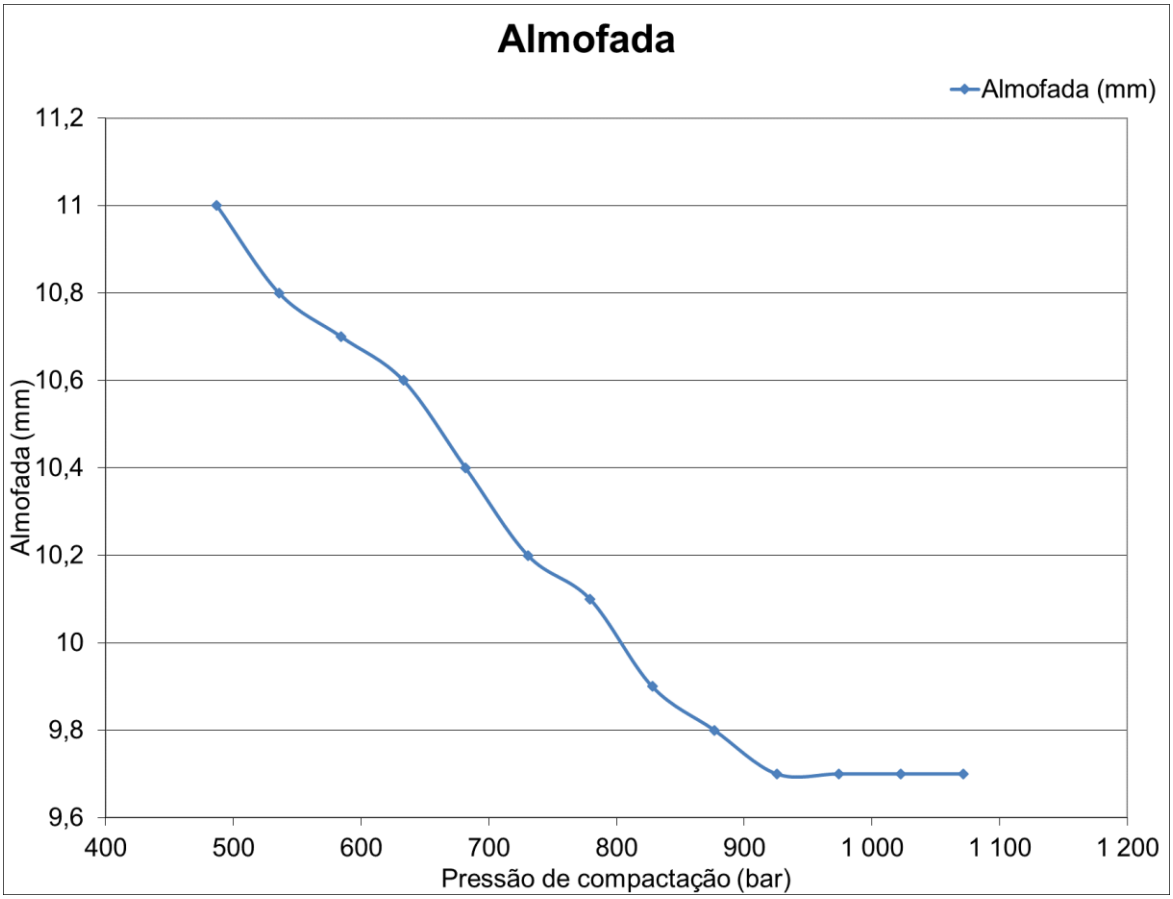


Figura 45: Estudo da variação da almofada para o guia de luz

O primeiro aspeto a ter em conta é que o valor de pressão de compactação, não deverá exceder 1082 bar (70% da pressão máxima admissível para a máquina de injeção). Tendo em conta ainda que, a

estabilidade da almofada é um dos indicadores de estabilidade do processo, procura-se então uma zona do gráfico em que isto se verifique. Assim, a pressão especifica de compactação adotada foi de 900 bar.

5.2.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 2

Para proporcionar uma revisão dos parâmetros de injeção ótimos para a produção do guia de luz, estes estão sumarizados na Tabela 22.

Tabela 22: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 2

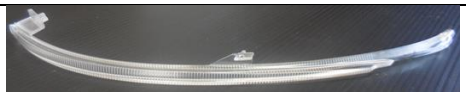
Descrição do projeto					
Número de cavidades	1+1				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	500				
Pressão de injeção no fundido (bar)	1100				
Tempo de arrefecimento (s)	25				
Dosagem	35				
Ponto de comutação (mm)	16				
Velocidade de injeção (mm/s)	45				
Tempo de compactação (s)	3.5				
Pressão de compactação (bar)	900				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	
	225	220	215	210	
Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	3				
Temperatura do termorregulador (ºC)	75				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	240	240	240
	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	240	240	-	-	-

Após a definição de todas as variáveis discutidas ao longo das etapas anteriores, o tempo de ciclo obtido para este caso de estudo foi de 41 segundos. Este valor representa uma melhoria de 8 segundos em relação ao processo em vigor anteriormente.

5.3 Caso 3: Suporte

O terceiro caso apresentado trata-se de um suporte que, em conjunto com mais três componentes, estará presente no retrovisor do automóvel. No sentido de proporcionar um melhor entendimento da montagem referida, a Tabela 23 ilustra todos os componentes que constituem este produto.

Tabela 23: Representação dos componentes e da sua montagem posterior para o caso 3

Peça esquerda	Peça direita
 Figura 46: Suporte esquerdo	 Figura 47: Suporte direito
 Figura 48: Guia de luz esquerdo	 Figura 49: Guia de luz direito
 Figura 50: Cover esquerdo	 Figura 51: Cover direito
 Figura 52: Lente esquerda	 Figura 53: Lente direita
 Figura 54: Montagem final esquerda	 Figura 55: Montagem final direita

Passaremos de seguida para a apresentação do conjunto de características a ter em conta aquando da produção do suporte. Posteriormente, será apresentado o estudo de otimização do processo, de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3.

5.3.1 Características a controlar no suporte

À semelhança dos casos acima apresentados, as informações relativas à inspeção visual, controlo dimensional, e testes funcionais estão representadas nas tabelas 24, 25 e 26 respetivamente.

Tabela 24: Inspeção visual do suporte

Inspeção visual

Características a controlar	Frequência	Amostra
Falta de matéria	7/8/9/10	2 injeções
Rebarbas	7/8/9/10	2 injeções
Queimados	7/8/9/10	2 injeções
Peças estaladas ou deformadas	7/8/9/10	2 injeções
Chupos	7/8/9/10	2 injeções
Verificar se o datador está correto	7/8/9/10	2 injeções

Nota: Os códigos representados na coluna da frequência têm como significado: no inicio de cada turno (código 7); no fim do turno (código 8); no inicio de série (código 9) e no fim de série (código 10)

Tabela 25: Controlo dimensional do suporte

Controlo dimensional

Peso	Mínimo	Máximo	Unidade	Equipamento	Frequência	Amostra
44.50±1	43.50	45.50	mm	Balança	7/8/9/10	2 injeções
Dimensão crítica D2 (Ver Figura 56)	**Mínimo**	**Máximo**	**Unidade**	**Equipamento**	**Frequência**	**Amostra**
4.07±0.01	4.06	4.08	mm	Calibre	7/8/9/10	2 injeções

Tabela 26: Testes funcionais do suporte

Testes Funcionais

Descrição das operações	Frequência	Amostra
Montagem com o guia de luz, PCB e cover	7/8/9/10	2 injeções
Soldadura e estanquidade	7/8/9/10	2 injeções

À semelhança dos casos anteriores, todas as características foram tidas em conta ao longo do processo experimental. Em destaque, a dimensão crítica representada por D2, que será alvo de análise na etapa do arrefecimento. Os calibres usados nestas medições, um para cada cavidade, estão representados na Figura 56.

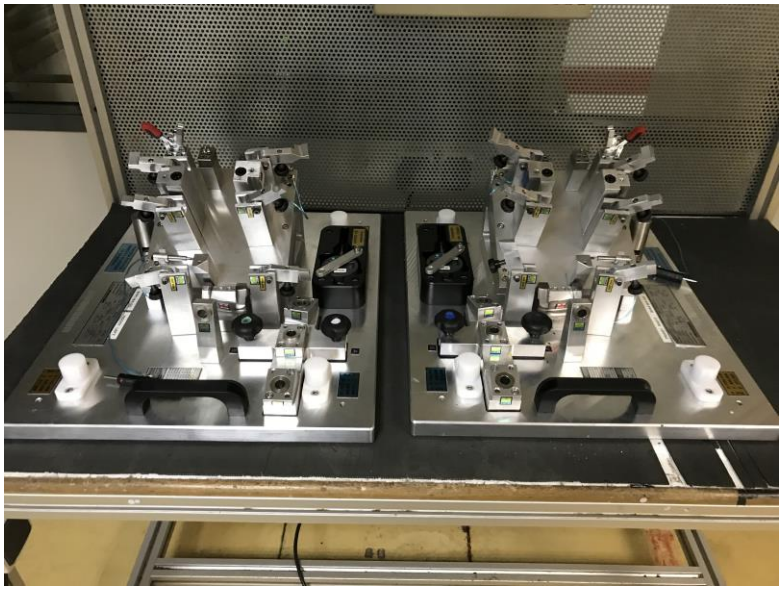


Figura 56: Calibres usados para a medição de D2

5.3.2 Etapa 1: Otimização da fase de injeção

De acordo com o procedimento descrito no capítulo 3, as temperaturas ao longo do cilindro e termorregulador foram definidas com base nas informações indicadas pelo fornecedor. O conjunto de variáveis adotado para esta etapa estão sumarizados na Tabela 27.

Tabela 27: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 1 para o suporte

Descrição do projeto					
Número de cavidades	1+1				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	1250				
Pressão de injeção no fundido (bar)	1751				
Tempo de arrefecimento (s)	20				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	250	255	250	245	240

Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	2				
Temperatura do termorregulador (ºC)	50				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	250	250	-	-	-

Posteriormente, e de forma a obtermos uma moldação com aproximadamente 95% da peça completa, foi definida uma dosagem de 80 mm e o ponto de comutação definido nos 10 mm de curso do parafuso. Assim, e tendo em conta os restantes passos do procedimento, foi encontrada a curva de viscosidade que se encontra representada no gráfico da Figura 57.

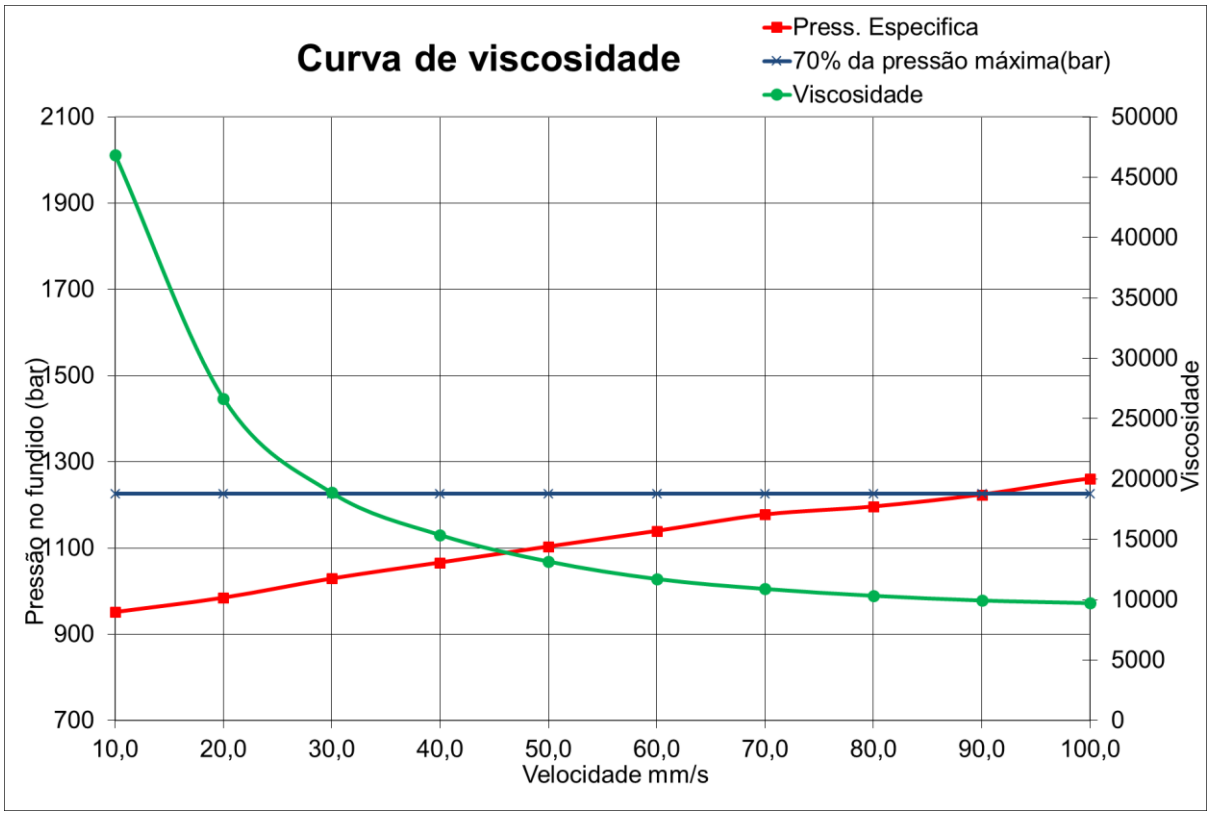


Figura 57: Curva da viscosidade para o suporte

Tendo em conta que a pressão no fundido não deverá exceder os 1226 bar, valor previamente definido como a pressão máxima admissível (70% da pressão máxima de injeção), a nossa velocidade de injeção não deverá ser superior a 90 mm/s. Para além disso, é possível observar no gráfico que a curva da viscosidade tende a estabilizar a partir de 70 mm/s. Assim, a velocidade de injeção adotada para o restante estudo foi de 70 mm/s.

A pressão de injeção ficou definida nos 1300 bar.

5.3.3 Etapa 2: Estudo de balanceamento de cavidades

O conjunto de variáveis adotado para esta etapa, encontra-se presente na Tabela 28.

Tabela 28: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 3 para o suporte

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	80
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Tempo de arrefecimento (s)	20
Velocidade de injeção (mm/s)	70

Assim, e de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3, foram registados o peso das moldações para as duas cavidades. Os resultados obtidos estão presentes no gráfico da Figura 58.

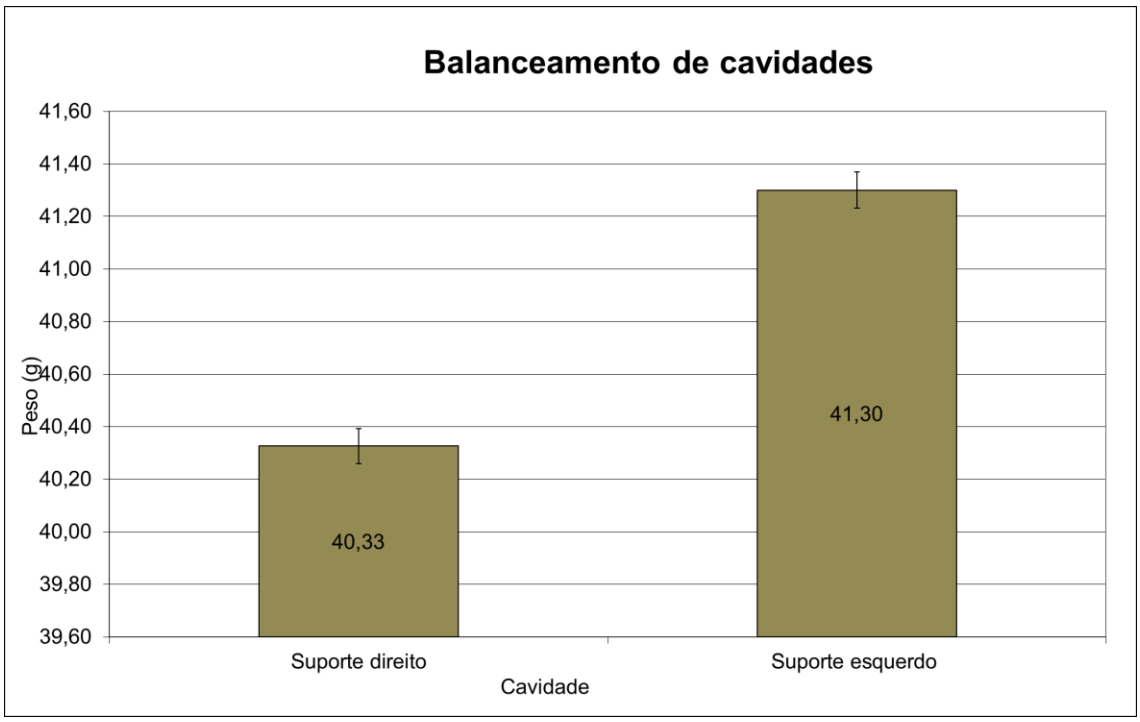


Figura 58: Estudo de balanceamento de cavidades para o suporte

De acordo com a análise do gráfico, é possível observar um desbalanceamento significativo entre as duas cavidades (cerca de 1 grama). Face a estes resultados, procurar-se-á compensar esta diferença com a aplicação da pressão de compactação e assim assegurar que as duas moldações estejam de acordo com o pretendido em termos de peso final.

5.3.4 Etapa 3: Estudo da queda de pressão

À semelhança do guia de luz, este molde de canais quentes, possui jito e ataque. Assim, será possível observar a queda de pressão nas diversas fases do canal de alimentação. Os valores de dosagem e ponto de comutação estão descritos na Tabela 29. Todas as outras variáveis mantiveram-se iguais às das usadas na etapa anterior.

Tabela 29: Descrição das alterações promovidas ao ponto de comutação para o suporte

Zona	Dosagem (mm)	Ponto de comutação (mm)
Bico de injeção	80	75
Canal quente	80	73
Jito	80	70
Ataque	80	69
Peça cheia	80	10

De acordo com esta informação, foi então encontrado o gráfico da queda de pressão para este caso de estudo que se encontra descrito no gráfico da Figura 59.

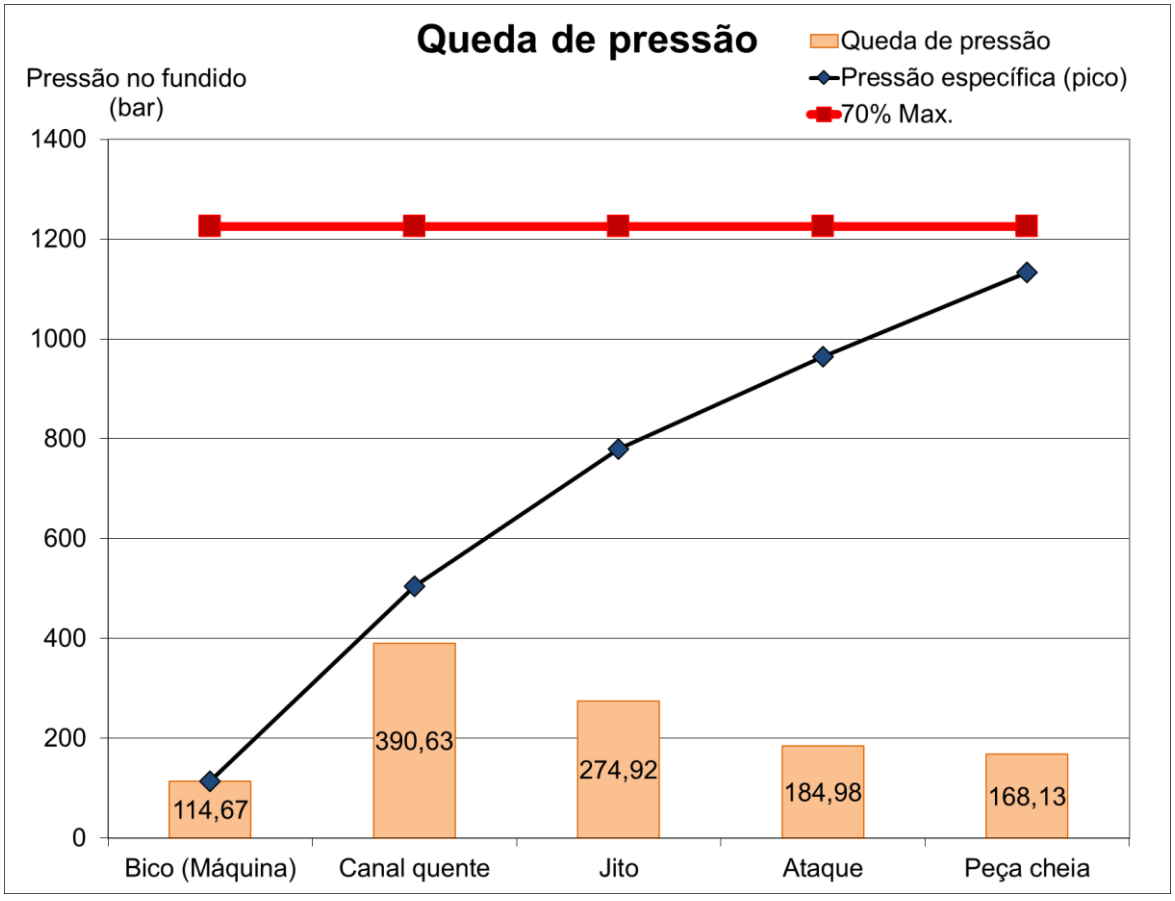


Figura 59: Estudo da queda de pressão para o suporte

Como é possível absorver no gráfico, a queda de pressão no canal quente da peça é o setor mais critico do canal de alimentação. Ainda assim, esse valor não está próximo da pressão de injeção admissível que é de 1226 bar (70% da pressão máxima de injeção).

5.3.5 Etapa 4: Estudo do tempo de compactação

De acordo com as mesmas variáveis adotadas na etapa 2, procedeu-se à realização do estudo do tempo de compactação. A pressão de compactação usada foi de 824 bar (70% do pico de pressão de injeção registada na comutação). Os valores obtidos encontram-se presentes no gráfico da Figura 60.

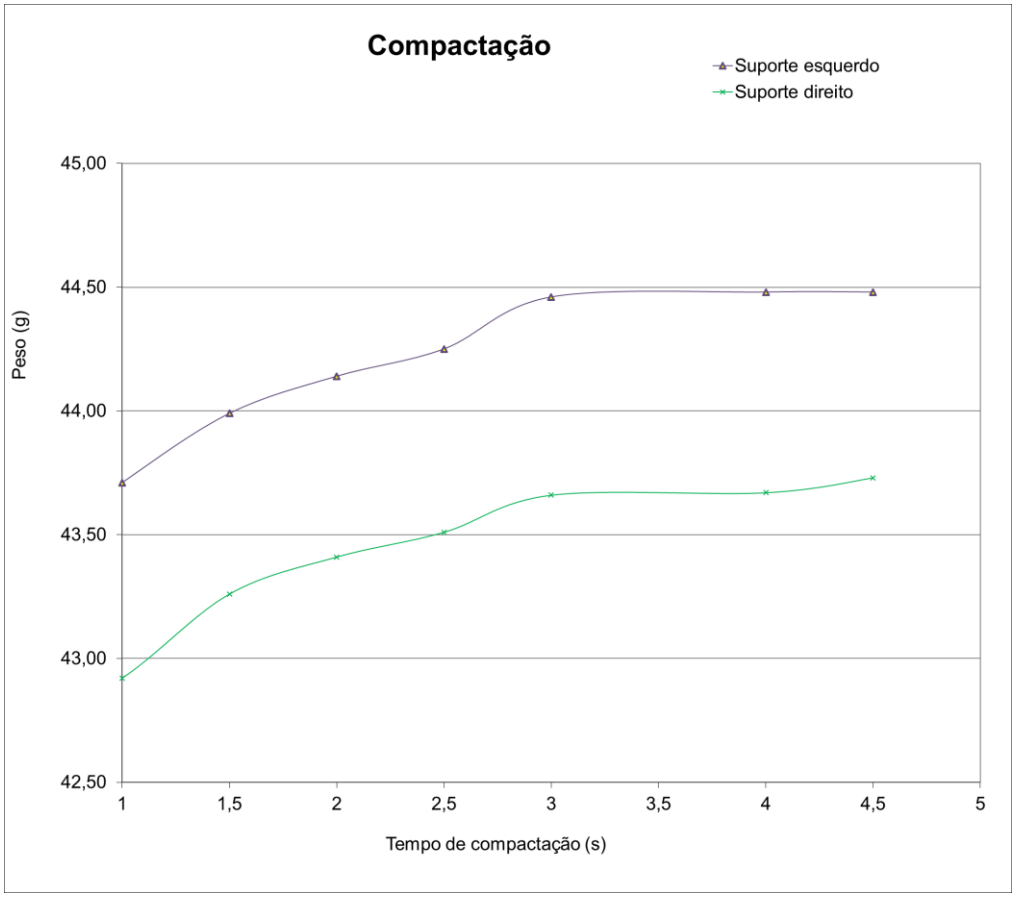


Figura 60: Estudo do tempo de compactação para o suporte

É possível observar que, como seria expectável, o aumento do tempo de compactação provoca também um aumento gradual no peso das moldações nas duas cavidades. Atendendo ao fato de que o peso deste produto terá que estar compreendido entre 43.50 e 45.50 mm, apenas com um tempo de compactação superior a 2.5 segundos é que isso se verifica. Assim, foi definido o tempo de compactação nos 3.5 segundos. Desta forma, asseguramos que as peças estarão dentro das tolerâncias e prevemos pequenas variações pontuais que possam existir.

Outros dos aspetos a ter em conta é o fato da solidificação do ataque pois é visível que a partir de 3 segundos de tempo de compactação, não há variações significativas no peso das peças. Isto porque quando o ataque solidifica, não é possível a entrada de mais material fundido para as cavidades do molde.

5.3.6 Etapa 5: Estudo do tempo de arrefecimento

Para esta etapa, o conjunto de variáveis adotado está presente na Tabela 30.

Tabela 30: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 5 para o suporte

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	80
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Velocidade de injeção (mm/s)	70
Tempo de compactação (s)	3.5

Como foi referido anteriormente, este estudo foi realizado com auxilio de um calibre, devidamente construído para o efeito. As peças são acondicionadas nos calibres e após serem corretamente fixadas, procedemos à medição de D2. Os resultados obtidos nesta etapa, estão representados no gráfico da Figura 61.

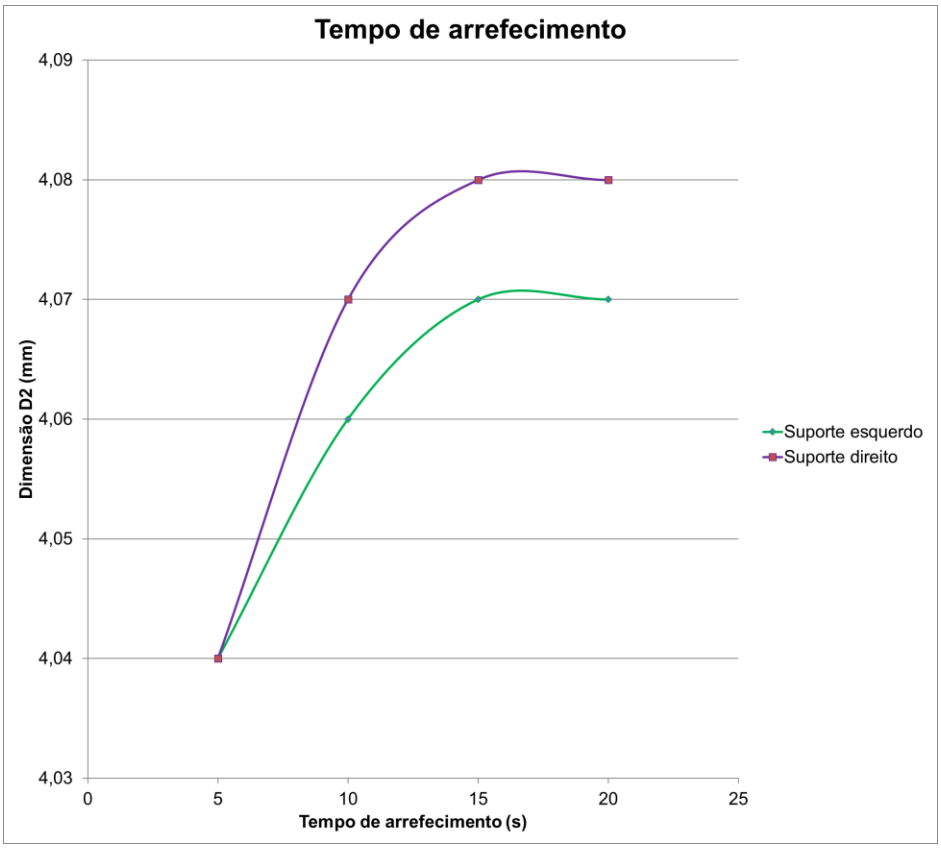


Figura 61: Estudo do tempo de arrefecimento para o suporte

Como é possível observar no gráfico, o tempo de arrefecimento possui uma influência significativa em D2. Atendendo ao fato de que D2 terá de estar compreendido entre 4.06 e 4.08 mm, apenas com um tempo de arrefecimento superior a 10 segundos, é que obtemos moldações com estas características. Sendo assim, foi definido um tempo de arrefecimento de 15 segundos. Assim, procuramos garantir que todas as moldações produzidas, possuam a dimensão D2 dentro das tolerâncias definidas.

5.3.7 Etapa 6: Validação da almofada

Na Tabela 31, estão representadas as variáveis adotadas nesta etapa.

Tabela 31: Resumo dos parâmetros utilizados na etapa 6 para o suporte

Variável do processo	Valor
Dosagem (mm)	80
Ponto de comutação definido através do curso do parafuso (mm)	10
Velocidade de injeção (mm/s)	70
Tempo de compactação (s)	3.5
Tempo de arrefecimento (s)	15

Neste estudo, a pressão de compactação definida inicialmente foi de 589 bar (50% da pressão registada na comutação que foi de 1177 bar). Assim, foi realizado o estudo de variação de almofada que se encontra presenta no gráfico da Figura 62.

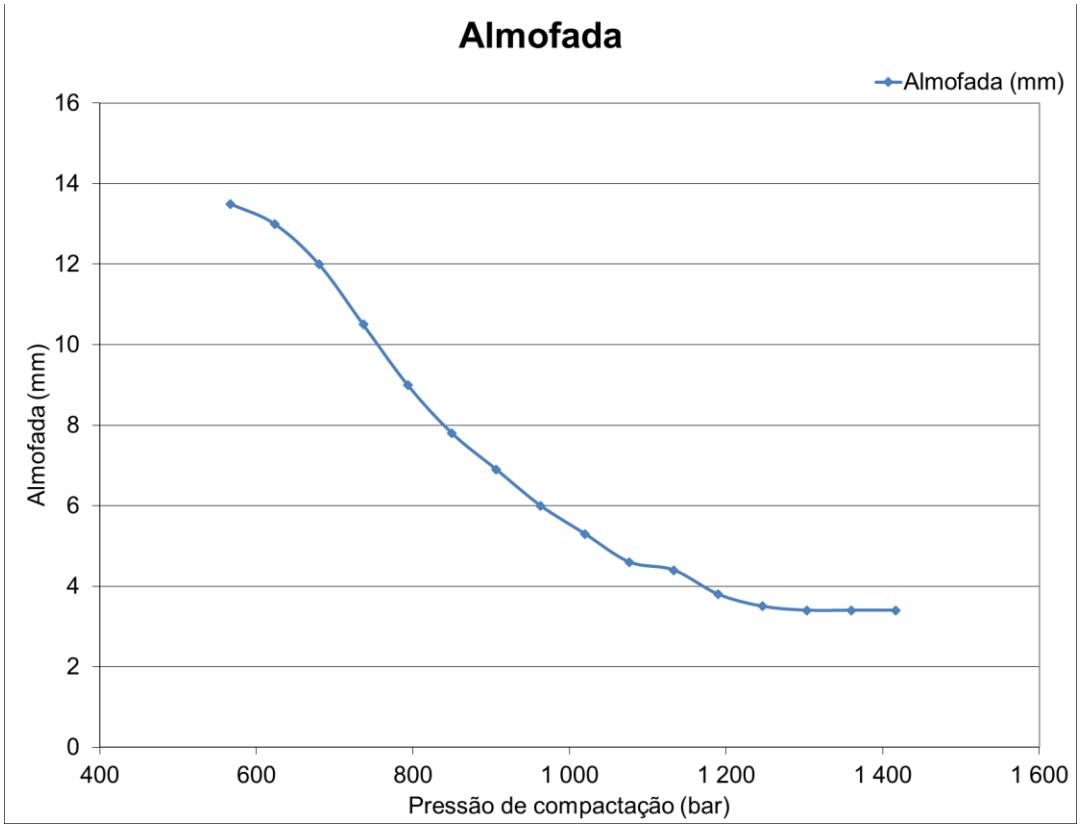


Figura 62: Estudo da variação da almofada para o suporte

Como é possível observar no gráfico, a almofada tende a estabilizar perto dos 4 mm, aplicando uma pressão de compactação de 1200 bar. Sendo assim, e tendo em conta que a pressão máxima admissível é de 1226 bar, poderá assumir-se os 1200 bar como sendo a pressão de compactação ideal para este caso de estudo.

5.3.8 Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para a caso 3

Para finalizar a análise do caso 3, a Tabela 32 contém o conjunto dos parâmetros ideais para o suporte,

Tabela 32: Síntese dos parâmetros de injeção ótimos para o caso 3

Descrição do projeto					
Número de cavidades	1+1				
Tipo de canal de alimentação	Canal quente				
Tipo de termorregulador	Água pressurizada				
Parametrização da injetora					
Força de fecho (kN)	1250				
Pressão de injeção no fundido (bar)	1300				
Tempo de arrefecimento (s)	15				
Dosagem	80				
Ponto de comutação (mm)	10				
Velocidade de injeção (mm/s)	70				
Tempo de compactação (s)	3.5				
Pressão de compactação (bar)	1200				
Perfil de temperaturas (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona5**
	250	255	250	245	240
Parametrização dos periféricos					
Temperatura de pré-secagem do material (ºC)	80				
Tempo de pré-secagem (h)	2				
Temperatura do termorregulador (ºC)	50				
Temperaturas do canal quente (ºC)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	250	250	-	-	-
	Zona 1	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**
	-	-	-	-	-

O processo de injeção para o caso de estudo 3 evidenciou um tempo de ciclo de 21 segundos.

Os estudos de capabilidade presentes nos Anexos III e IV revelam que nas duas cavidades, direita e esquerda, as moldações encontram-se dentro dos limites de controlo e por isso, podemos assumir a boa capacidade da máquina para este caso de estudo.

6. CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A otimização de processos produtivos, é, naturalmente, um dos maiores desafios da indústria dos plásticos. Assim, o principal objetivo desta dissertação passava pela obtenção de processos de injeção robustos, consistentes e que manifestassem ainda qualidade nas peças produzidas. Foram apresentados três casos de estudo, sendo eles a lente transparente, o guia de luz e o suporte.

Em relação ao caso da lente transparente, trata-se de um processo crítico na empresa visto ser um molde com diversas cavidades e o fato de que as moldações, tinham que possuir boas propriedades superficiais. Concretamente, o processo produtivo, este apresentava algumas dificuldades aquando da extração das peças devido ao fato de haver demasiada compactação em certas cavidades. Isto porque existe um certo desbalanceamento entre as mesmas, que se manifesta mais significativamente com o uso de velocidades baixas. Como discutido na etapa do estudo reológico, a velocidades reduzidas, a viscosidade do material variava mais abruptamente. Assim, fruto deste estudo foi possível definir um processo estável e consistente, capaz de compensar pequenas variações naturais como relativas à máquina, molde ou material.

No caso do guia de luz, também este constituía um projeto de elevada importância devido às excelentes propriedades óticas requeridas, visto este ser um produto responsável pela condução de luz. Além disso, esta é uma peça que possui um controlo dimensional apertado, tendo o processo produtivo que ser capaz de produzir com qualidade consistente. Assim, e muito graças à etapa do estudo do tempo de arrefecimento, foi possível perceber concretamente a influência das variáveis do processo que mais afetavam as dimensões da peça. Contando com as informações retiradas de todas as etapas relativas ao estudo de otimização, foi possível definir um conjunto de variáveis ótimas, que originaram uma produção eficaz, evidenciando ainda melhorias no tempo de ciclo.

Relativamente ao suporte, este apresentava-se como sendo um projeto recente na empresa e, procurando definir um processo eficaz, logo desde o inicio, foi adotado como caso de estudo para esta dissertação. Com o auxilio dos estudos de capabilidade da máquina foi possível obter, à semelhança dos casos anteriores, um processo robusto e consistente.

Assim, e em jeito de conclusão, ficou claro que a aplicação de princípios científicos ao processo de moldação por injeção, é uma mais valia para a sua compreensão..

6.2 Trabalhos Futuros

O conjunto de informações que se podem retirar do estudo realizado nesta dissertação tem um impacto direto e imediato em todos os processos produtivos de uma empresa. No entanto, há sempre mais a fazer e sobretudo, mais conhecimento a retirar sobre a influência de todos os parâmetros, em conjunto, num processo de moldação por injeção. Nesse sentido, surge o DOE (*Design of Experiments*). Este conceito trata da combinação de fatores e do planeamento de experiências a realizar com todos esses mesmos fatores. Isto leva a uma análise mais eficaz e menos demorosa, seja em que contexto for. Este processo sofreu uma série de avanços e melhoramentos ao longo dos anos, e é frequentemente associado a duas pessoas, G. Taguchi e Ronald Fischer. (2)

Assim, com o auxilio desta ferramenta, seremos capazes de planear uma série de experiências, para cada caso de estudo, e estudar a influência de todas as variáveis do processo. Não apenas a influência de cada parâmetro exclusivamente, mas também a de vários quando aplicados em simultâneo. Dito isto, o DOE apresenta-se como sendo o próximo passo, após a conclusão deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

1. Biomerics. [Online] 2017. [Citação: 5 de 9 de 2017.] http://biomerics.com/scientific-injection-molding/.

2. Kulkarni, Suhas. *Robust process development and scientific molding.* Munich : HANSER Publications, 2010. ISBN 978-3-446-42275-9.

3. Injection Molding Online. [Online] [Citação: 10 de 10 de 2017.] http://www.injectionmoldingonline.com/Molding101/Polymers.aspx .

4. Escola LF. ESCOLA LF Laurentino de Freitas. [Online] [Citação: 1 de 10 de 2017.] http://www.escolalf.com.br/polimeros-conhecer-as-resinas-e-fundamental/.

5. Plástico Moderno. Plástico. [Online] 2017. [Citação: 15 de 9 de 2017.] http://www.plastico.com.br/18114/2/.

6. Maia, J.M. e Covas, J.A. Fundamentos de Processamento e Reologia. 1999.

7. Guia de bolso de técnicas de análise estatística . s.l. : Atlas Copco .

8. Braghin, Raul. Quality and Training. [Online] 21 de 8 de 2013. [Citação: 25 de 10 de 2017.] http://raulbraghin.blogspot.pt/2013/08/brainstorming-e-diagrama-de-ishikawa-o.html.

9. Misumi. *Technical Tutorial.* [Online] 5 de 2 de 2010. [Citação: 10 de 10 de 2017.] http://www.misumi-techcentral.com/tt/en/mold/2010/02/028-molding-shrinkage-ratios-of-major-plastic-materials.html.

10. NPTEL. [Online] [Citação: 9 de 10 de 2017.] http://nptel.ac.in/courses/103103029/module7/lec38/1.html.

ANEXO I – FICHA TÉCNICA DO PMMA PLEXIGLAS 8N

Product Information

PLEXIGLAS® 8N Molding Compound

Product Profile:

PLEXIGLAS® 8N is an amorphous thermoplastic molding compound (PMMA).

Typical properties of PLEXIGLAS® molding compounds are:
- good flow
- high mechanical strength, surface hardness and abrasion resistance
- high light transmission
- very good weather resistance
- free colorability due to crystal clarity

Special properties of PLEXIGLAS® 8N are:
- optimum mechanical properties
- maximum heat deflection temperature
- good flow / melt viscosity
- AMECA listing.

Application:

Used for injection molding optical and technical items.

Examples:

optical waveguides, luminaire covers, automotive lighting, instrument cluster covers, optical lenses, displays, etc.

Processing:

PLEXIGLAS® 8N can be processed on injection molding machines with 3-zone general purpose screws for engineering thermoplastics.

Physical Form / Packaging:

PLEXIGLAS® molding compounds are supplied as pellets of uniform size, packaged in 25kg polyethylene bags or in 500kg boxes with PE lining; other packaging on request.

Properties:

	Parameter	Unit	Standard	PLEXIGLAS® 8N
Mechanical Properties				
Tensile Modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527	3300
Stress @ Break	5 mm/min	MPa	ISO 527	77
Strain @ Break	5 mm/min	%	ISO 527	5.5
Charpy Impact Strength	23°C	kJ/m²	ISO 179/1eU	20
Thermal Properties				
Vicat Softening Temperature	B / 50	°C	ISO 306	108
Glass Transition Temperature		°C	IEC 10006	117
Temp. of Deflection under Load	0.45 MPa	°C	ISO 75	103
Temp. of Deflection under Load	1.8 MPa	°C	ISO 75	98
Coeff. of Linear Therm. Expansion	0 - 50°C	E-5 /°K	ISO 11359	8
Fire Rating			DIN 4102	B2
Flammability UL 94	1.6 mm	Class	IEC 707	HB
Rheological Properties				
Melt Volume Rate, MVR	230°C / 3.8kg	cm³/10min	ISO 1133	3
Optical Properties	d=3 mm			
Luminous transmittance	D65	%	ISO 13468-2	92
Haze			ASTM D1003	< 0.5
Refractive Index			ISO 489	1.49
Other Properties				
Density		g/cm³	ISO 1183	1.19
Recommended Processing Conditions				
Predrying Temperature		°C		max. 98
Predrying Time in Desiccant-Type Drier		h		2 - 3
Melt Temperature		°C		220 - 260
Mold Temperature (Injection Molding)		°C		60 - 90

All listed technical data are typical values intended for your guidance. They are given without obligation and do not constitute a materials specification.

This information and all further technical advice is based on our present knowledge and experience. However, it implies no liability or other legal responsibility on our part, including with regard to existing third party intellectual property rights, especially patent rights. In particular, no warranty, whether express or implied, or guarantee of product properties in the legal sense is intended or implied. We reserve the right to make any changes according to technological progress or further developments. The customer is not released from the obligation to conduct careful inspection and testing of incoming goods. Performance of the product described herein should be verified by testing, which should be carried out only by qualified experts in the sole responsibility of a customer. Reference to trade names used by other companies is neither a recommendation, nor does it imply that similar products could not be used.
The Business Unit Performance Polymers of Evonik is a worldwide manufacturer of PMMA molding compounds sold under the PLEXIGLAS® trademark on the European, Asian, African and Australian Continent and under the trademark ACRYLITE® in the Americas.
® = registered trademark
PLEXIGLAS, PLEXALLOY, PLEXIMID and PLEX are registered trademarks of Evonik Röhm GmbH, Darmstadt, Germany

Evonik Röhm GmbH Kirschenallee D-64293 Darmstadt
Telefon: +49 6151 18-4711 Telefax: +49 6151 18-3177
www.plexiglas-polymers.com

Ref. No.: MC106-E v0160 Date: 2010-01-15

ANEXO II – FICHA TÉCNICA DO ABS NOVODUR HH-112

Novodur HH-112

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

STYROLUTION
Driving Success. Together.

Technical Datasheet

DESCRIPTION

Novodur® HH-112 is a high heat injection molding grade. It provides extraordinary heat resistance combined with enhanced stiffness.

FEATURES

- Very high heat resistance
- High stiffness

APPLICATIONS

- Automotive rear lamp housings
- Glove box caps

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
Rheological Properties			
Melt Volume Rate 220 °C/10 kg	ISO 1133	cm³/10 min	6
Mechanical Properties			
Charpy Notched Impact Strength, 23° C	ISO 179	kJ/m²	12
Charpy Notched Impact Strength, -30° C	ISO 179	kJ/m²	5
Charpy Unnotched, 23° C	ISO 179	kJ/m²	140
Charpy Unnotched, -30° C	ISO 179	kJ/m²	80
Tensile Stress at Yield, 23° C	ISO 527	MPa	58
Tensile Strain at Yield, 23° C	ISO 527	%	3.1
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	2700
Nominal Strain at Break, 23 °C	ISO 527	%	8
Flexural Strength	ISO 178	MPa	81
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	2700
Hardness, Ball Indentation	ISO 2039-1	MPa	114
Thermal Properties			
Vicat Softening Temperature VST/B/50 (50°C/h, 50N)	ISO 306	°C	112
Vicat Softening Temperature, VST/A/50 (50°C/h, 10N)	ISO 306	°C	118
Heat Deflection Temperature A; (annealed, 1.8 MPa)	ISO 75	°C	109
Heat Deflection Temperature B; (annealed, 0.45 MPa)	ISO 75	°C	113
Coefficient of Linear Thermal Expansion	ISO 11359	10^(-6)/°C	90

Contact us:
Phone +49 2133 51 4007
infopoint.emea@styrolution.com
www.styrolution.com

Novodur HH-112

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

STYROLUTION
Driving Success. Together.

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
Thermal Conductivity	DIN 52612-1	W/(m K)	0.17
Electrical Properties			
Dielectric Strength, Short Time, 1.5 mm	IEC 60243-1	kV/mm	41
Volume Resistivity	IEC 60093	Ohm*m	1E13
Comparative Tracking Index	IEC 60112	V	600
Other Properties			
Density	ISO 1183	kg/m³	1050
Moisture Absorption, Equilibrium 23°C/50% RH	ISO 62	%	0.25
Processing			
Linear Mold Shrinkage	ISO 294-4	%	0.4 - 0.7
Melt Temperature Range	ISO 294	°C	230 - 260
Mold Temperature Range	ISO 294	°C	30 - 80
Injection Velocity	ISO 294	mm/s	200
Drying Temperature		°C	80
Drying Time		h	2 - 4
Max Service Temperature		°C	90

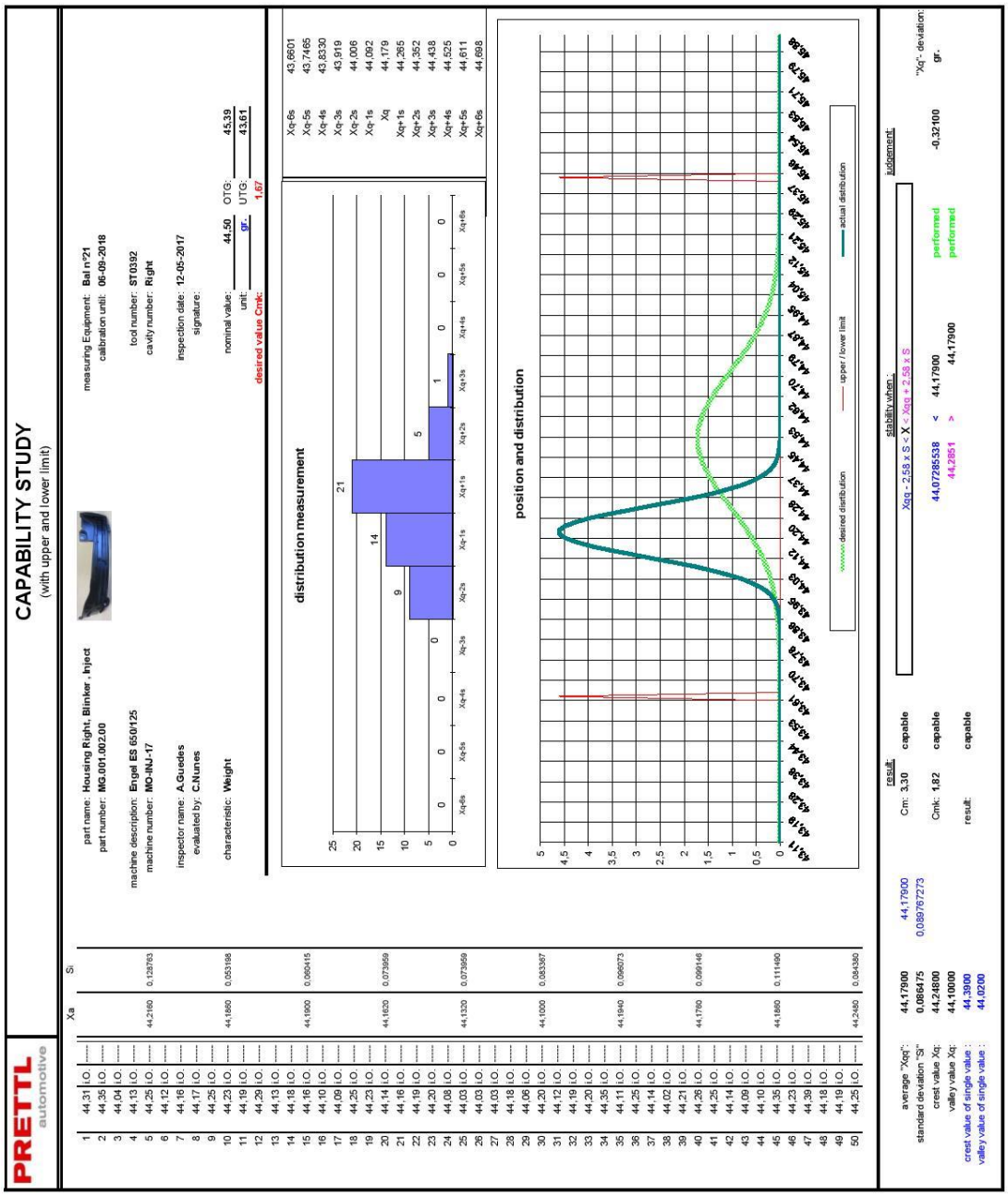
Typical values for uncolored products

SUPPLY FORM

Novodur® is delivered in the form of cylindrical, spherical, or cubical pellets. The bulk density of the pellets is from 0.55 to 0.65 g/cm³. Values may differ for special grades. Standard Packaging unit: 25 kg PE-bag on palette, shrunk or wrapped with PE film. In addition, delivery in larger units of up to 1000 kg (IBC = Intermediate Bulk Container) or silo trucks can be arranged. In dry areas with normal temperature control, Novodur pellets can be stored for relatively long periods of time without any change in mechanical properties. With unstable colors, however, storage over a number of years can give rise to some change in color. Under poor storage conditions, Novodur absorbs moisture, but this can be removed by drying.

Contact us:
Phone +49 2133 51 4007
infopoint.emea@styrolution.com
www.styrolution.com

ANEXO III – ESTUDO DE CAPABILIDADE PARA O SUPORTE DIREITO (CASO DE ESTUDO 3)



ANEXO IV – ESTUDO DE CAPABILIDADE PARA O SUPORTE ESQUERDO (CASO DE ESTUDO 3)

