



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Lucas Manuel Ferreira Azevedo

**Definição de métricas para previsão de
defeitos estéticos na moldação por injeção
através de simulação numérica**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Lucas Manuel Ferreira Azevedo

**Definição de métricas para previsão de
defeitos estéticos na moldação por injeção
através de simulação numérica**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor António Brito

e

Engenheiro Paulo Pereira

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgal
CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Agradecimentos

Após a realização deste trabalho e no culminar destes 5 anos gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento deste projeto e desta longa jornada académica.

À Universidade do Minho e a todo o corpo docente, pela entrega, partilha e empenho no ensino ao longo dos cinco anos de formação académica.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, Professor António Brito e Engenheiro Paulo Pereira, por todo o apoio, disponibilidade, confiança, auxílio ao longo deste projeto e, mais importante, pelo ensinamento transmitido.

À Fehst Componentes, por ter aceitado receber-me e ter proporcionado as condições necessárias à realização deste trabalho. Agradecer igualmente a todos os colaboradores, por se mostrarem recetivos a incluir-me no dia a dia da empresa e pela partilha de conhecimento.

Aos meus colegas de estágio, pela ajuda, apoio e por todos os bons momentos passados juntos ao longo deste ano. A todos desejo muita sorte no seu futuro profissional.

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

A todos, um muito obrigado.

Definição de métricas para a previsão de defeitos estéticos na moldação por injeção através de simulação numérica - Resumo

A indústria automóvel é constantemente desafiada ao nível das capacidades técnicas e produtivas, a fim de alcançar um maior nível de eficiência de recursos, qualidade de produto e redução de custos associados. A estes fatores, encontram-se ainda aplicados os desafios de sustentabilidade, diretamente relacionados com a eficiência produtiva, isto é, a diminuição de refugo e consumo energético, desenvolvimento eficaz do produto e da ferramenta produtiva, automatização e robotização. De forma a atuar sobre os fatores mencionados, e com o objetivo de atingir uma maior capacidade de previsão, sem custos associados, desenvolveram-se *softwares* de modelação numérica, com capacidades de simulação do processo de injeção. Estes, atualmente com elevados potenciais de cálculo, apresentam capacidade de antecipação de defeitos. Porém, de modo que os dados sejam eficazes na previsão de defeitos, é necessário estabelecer métricas que definam indicadores de qualidade.

Tendo em vista a conceção de uma ponte de informação entre o processo de injeção real e o de modelação numérica, selecionou-se uma peça, de produção em série, que permitiu, geometricamente, estudar os defeitos estéticos em causa, sendo eles, os chupados e linhas de soldadura. Com base nos métodos estatísticos presentes no *software*, elaborou-se um *DOE*, para cada defeito, tendo em conta as condições de processo que influenciam os defeitos em causa. Assim, com auxílio do *DOE*, obteve-se um conjunto de experiências com condições de processamento que incidem, positivamente e negativamente, sobre os defeitos a estudar. A partir destes dados, foram realizadas simulações, acompanhadas pela injeção de peças com as referidas condições, de modo a ser possível executar uma análise de dados numéricos, bem como uma análise qualitativa ou quantitativa das moldações.

A partir do equipamento de medição ótico 3D de alta resolução (*Alicona Infinite Focus SL*) efetuaram-se medições sobre as várias linhas de soldadura, obtendo-se dados relativos à profundidade e largura do entalhe em V. De modo a complementar o estudo, as peças foram pintadas com o objetivo de compreender o impacto da geometria do entalhe em V no processo de revestimento, a fim de definir o ângulo mínimo de linhas de soldadura que garantisse a qualidade estética do produto. Relativamente aos chupados, efetuou-se uma análise qualitativa com base na classificação dada por colaboradores, após a pintura das peças. Tendo apenas como comparação os dados do *Moldex3D®* e a avaliação qualitativa, determinou-se um valor numérico limite, que proporcionasse a qualidade da moldação.

Deste estudo, concluiu-se que linhas de soldadura com ângulos superiores a 120° tendem a apresentar entalhes de menor dimensão permitindo assim obter o máximo de qualidade estética possível. Relativamente aos chupados, estes tornam-se invisíveis ao olho humano, quando numericamente apresentam uma profundidade inferior a 0,010mm. **Palavras-Chave:** Chupados, Indicadores de qualidade, Linhas de soldadura, *Moldex3D®*, Moldação por injeção.

Definition of measurements for predicting esthetic defects in injection molding through numerical simulation

Abstract

The automotive industry is constantly faced with technical and production challenges in order to achieve higher levels of resource efficiency, product quality, and cost reduction. These challenges are further compounded by sustainability concerns, which are directly related to production efficiency, such as reducing waste and energy consumption, effective product development and production tool development, automation and robotics. To address these factors and to achieve better predictive capabilities without additional costs, numerical modeling software with injection process simulation capabilities were developed. Currently, these software solutions have high computational potential and can anticipate production defects. However, for the data to be effective in defect prediction, it is necessary to establish metrics that define quality indicators.

To establish an information bridge between the real injection process and numerical modeling, a mass-produced part was selected for geometrically studying specific aesthetic defects, as sink marks and weld lines. Based on the statistical methods available in the software, a Design of Experiments (DOE) was developed for each defect, considering the process conditions that influence the respective defects. Thus, with the aid of DOE, a set of experiments with various processing conditions affecting the defects was obtained. Based on this data, simulations were conducted, accompanied by the injection of parts under the specified conditions, enabling both numerical data analysis and a qualitative or quantitative analysis of the moldings.

Measurements were taken on the various weld lines from different conditions using a high-resolution 3D optical measurement device (Alicona Infinite Focus SL), obtaining data on the depth and width of the V-notch. To complement the study, the parts were painted to understand the impact of the V-notch geometry on the coating process, in order to define the minimum angle of weld lines that would ensure the aesthetic quality of the product.

Regarding sink marks, a qualitative analysis was performed based on the classification provided by collaborators at the inspection station after the painting of the components. Only using the Moldex3D® data and qualitative evaluation as a basis for comparison, a numerical limit value was determined to ensure the quality of the molding.

From this study, it was concluded that weld lines with angles greater than 120° tend to exhibit smaller notches, thus allowing for the highest possible aesthetic quality. As for sink marks, they become invisible to the human eye when they have a numerical depth below 0.010mm.

Keywords: Injection molding, Moldex3D®, Quality indicators, Sink marks, Weld lines.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Empresa	5
1.5 Estrutura da Dissertação	6
Capítulo 2 - Conceitos teóricos	7
2.1 Moldação por injeção	7
2.1.1 O ciclo de injeção	7
2.1.2 Máquina de injeção	11
2.1.3 Gráficos Pressão vs. Tempo	11
2.2 Aspectos fenomenológico do processo de moldação por injeção	13
2.2.1 Reologia do material	13
2.2.2 Comportamento termomecânico	15
2.2.3 Defeitos estéticos	18
2.2.3.1 Linhas de soldadura	18
2.2.3.2 Chupados	24
2.3 Evolução dos Software's CAE	28
2.3.1 Moldex3D®	34
2.3.1.1 Moldex3D® - Linhas de soldadura	36
2.3.1.2 Moldex3D® - Chupados	36
2.4 Método dos Elementos Finitos (FEM)	37
Capítulo 3 - Construção e Validação do Modelo	42
3.1 Conceção do Modelo em Moldex3D®	42
3.1.1 Seleção da Peça	42
3.1.2 Importação do CAD	43
3.1.3 Construção do sistema de alimentação	43

3.1.4 Molde e Sistema de Refrigeração	45
3.1.5 Construção da malha	46
3.1.6 Material e Condições de Processamento	47
3.2 Validação do Modelo	48
3.2.1 Gráficos de Pressão vs. Tempo	48
3.2.2 Localização das linhas de soldadura	50
Capítulo 4 - Produção e Avaliação de DOE's	52
4.1 Produção de DOE's	52
4.1.1 DOE's – Linhas de Soldadura	52
4.1.2 DOE's - Chupados	53
4.2 Avaliação preliminar de DOE's	55
4.2.1 Linhas de soldadura	55
4.2.2 Chupados	56
Capítulo 5 - Análises Morfológicas das Peças Injetadas	58
5.1. Técnica de Avaliação das Linhas de Soldadura	58
5.2. Análises de resultados – Linhas de Soldadura	59
5.2.1. Tratamento de dados	59
5.2.2. Linhas de Soldadura – Discussão de resultados	62
5.2.3. Influência das variáveis de processo nas linhas de soldadura	69
5.2.4. Avaliação do impacto da pintura na visibilidade das linhas de soldadura	72
5.3. Técnica de Avaliação dos Chupados	75
5.3.1. Análise de resultados – Chupados	76
Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos futuros	78
Referências Bibliográficas	81
Anexos	88
Anexo 1 - Esquema de linhas água do molde a) Bucha, b) Cavidade	88
Anexo 2 - Modelo de simulação	89
Anexo 3 - Malha da peça	90

Anexo 4 - Ficha Técnica _____	91
Anexo 5 - Perfil de velocidades de injeção _____	92
Anexo 6 - Perfil de pressão na fase de injeção _____	92
Anexo 7 - Perfil de pressão na fase de compactação _____	93

Índice de Figuras

Figura 1. Fluxograma de atividades _____	4
Figura 2. Instalações da Empresa Fehst Componentes, Lda _____	5
Figura 3. Ciclo de injeção _____	8
Figura 4. Fecho e trancamento do molde _____	8
Figura 5. Fase de injeção _____	8
Figura 6. Fluxo em fonte e direção da transferência de calor _____	9
Figura 7. Fase de pressurização ou compactação _____	9
Figura 8. Fase de plasticização em simultâneo com a fase de arrefecimento _____	10
Figura 9. Abertura do molde e extração _____	10
Figura 10. Unidades funcionais do equipamento de injeção _____	11
Figura 11. Evolução da Pressão _____	12
Figura 12. Evolução da pressão de injeção no fuso _____	13
Figura 13. Pressão hidráulica vs. pressão efetiva sobre o material _____	13
Figura 14. Comportamento viscoelástico dos polímeros _____	14
Figura 15. Comportamento da viscosidade em função da velocidade de corte _____	15
Figura 16. Comportamento termomecânico _____	16
Figura 17. Perfil de velocidades (a) de escoamento; (b) de corte _____	17
Figura 18. Linhas de soldadura causadas por efeitos geométricos _____	18
Figura 19. Linha de soldadura _____	19
Figura 20. Trajetória de fundido durante a interface entre frentes de fluxo _____	19
Figura 21. Ensaio de tração para análise do impacto das condições de processamento nas linhas de soldadura _____	20
Figura 22. Superfície da linha de soldadura através de microscopia de força atômica (AFM) _____	21
Figura 23. Efeito da velocidade de injeção, temperatura de fundido e do molde na largura da linha de soldadura _____	22
Figura 24. Efeito da temperatura do molde e velocidade de injeção na profundidade da linha de soldadura _____	22
Figura 25. Formação de linhas de soldadura: (a) aproximação das frentes de fluxo; (b) formação da linha de soldadura com determinado ângulo de união; (c) formação da linha de fluxo; (d) 1: linha de fluxo; 2: linha de soldadura _____	23
Figura 26. Posição da linha de soldadura tendo em conta as condições de processamento _____	24

Figura 27. Chupados _____	25
Figura 28. Aumento de massa térmica originado por um elemento de reforço _____	25
Figura 29. Profundidade do chupado: (a) temperatura de fundido (A) vs. temperatura do molde (B); (b) temperatura de fundido (A) vs. pressão de compactação (C) _____	26
Figura 30. Profundidade do chupado: temperatura do molde (B) vs. pressão de compactação (C) _____	27
Figura 31. Efeito da velocidade de injeção e pressão de compactação no chupado _____	27
Figura 32. Fluxograma de desenvolvimento de produto com auxílio de software de simulação _____	35
Figura 33. Apresentação de linhas de soldadura no Moldex3D® _____	36
Figura 34. Representação da probabilidade de ocorrência de chupados no Moldex3D® _____	36
Figura 35. Processo de discretização de um domínio por elementos finitos _____	38
Figura 36. Formas geométricas de elementos finitos: (a) unidimensionais; (b) bidimensionais _____	38
Figura 37. Formas geométricas de elementos finitos tridimensionais _____	39
Figura 38. Efeito do número de elementos _____	40
Figura 39. Tipologias de malhas no Moldex3D® _____	40
Figura 40. Boden Ablage M LL: (a) vista frontal; (b) vista posterior _____	42
Figura 41. Boden Ablage M LL, Sistema de alimentação de canais frios _____	42
Figura 42. Biblioteca de Ataques no Moldex3D® _____	43
Figura 43. Construção dos canais de alimentação _____	44
Figura 44. Canais frios: (a) Modelado no Moldex3D®; (b) Caso real _____	44
Figura 45. Representação do sistema de alimentação híbrido _____	45
Figura 46. Modelação do sistema de refrigeração _____	46
Figura 47. Comparação do gráfico de pressão de injeção _____	49
Figura 48. Localização e comparação das linhas de soldadura: (a) caso real; (b) caso modelado pelo Moldex3D® _____	51
Figura 49. Run 4 - Linha de soldadura não ilustrada _____	56
Figura 50. Equipamento de medição - Alicona Infinite Focus SL _____	59
Figura 51. Run 1 - Medição do perfil de forma _____	60
Figura 52. Run 1 - Perfil de forma _____	60
Figura 53. Run 1 - Eliminação das rugosidades do perfil de forma _____	61
Figura 54. Run 1 - Perfil de forma das três medições das linhas de soldadura _____	61
Figura 55. Run 1 - Perfil de forma médio _____	61
Figura 56. Curva morfológica das linhas de soldadura _____	62

Figura 57. Evolução da largura das linhas de soldadura	63
Figura 58. Evolução da profundidade das linhas de soldadura	63
Figura 59. Deslocação da linha de soldadura: (a) Run 3 (b) Run 4	64
Figura 60. Curva morfológica das linhas de soldadura	65
Figura 61. Evolução da largura das linhas de soldadura	66
Figura 62. Evolução da profundidade das linhas de soldadura	66
Figura 63. Comparação de linhas de soldadura: (a) run base; (b) run 7	67
Figura 64. Evolução global da largura e profundidade das linhas de soldadura	68
Figura 65. Evolução global da profundidade das linhas de soldadura	69
Figura 66. Efeito da interação da temperatura do molde e de fundido na largura da linha de soldadura	69
Figura 67. Efeitos médios da largura da linha de soldadura	70
Figura 68. Efeito da interação da temperatura do molde e de fundido na profundidade da linha de soldadura	71
Figura 69. Efeitos médios da profundidade da linha de soldadura	71
Figura 70. Análise das linhas de soldadura com auxílio de uma lente de ampliação	73

Índice de Tabelas

Tabela 1. Cálculo do desvio entre curvas _____	50
Tabela 2. DOE de Linhas de Soldadura: Fatores de Controlo _____	53
Tabela 3. DOE de Linhas de Soldadura: Fatores de Qualidade _____	53
Tabela 4. DOE de Chupados: Fatores de Controlo _____	54
Tabela 5. DOE de Chupados: Fatores de Qualidade _____	54
Tabela 6. Avaliação de DOE's das linhas de soldadura _____	55
Tabela 7. Avaliação de DOE's dos chupados _____	56
Tabela 8. Resposta médias para os chupados _____	57
Tabela 9. Resultados estatísticos das linhas de soldadura _____	62
Tabela 10. Resultados estatísticos das linhas de soldadura _____	65
Tabela 11. Resposta médias para a linha de soldadura _____	70
Tabela 12. Análise das linhas de soldadura após o processo de pintura _____	72
Tabela 13. Análise de chupados após o processo de pintura _____	76

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

O processo de moldação por injeção é uma das técnicas mais relevantes para a produção de produtos plásticos, com aplicações na indústria automóvel, aeronáutica, eletrónica, construção civil, entre outras. A indústria, devido aos elevados padrões de exigência por parte dos clientes, é forçada a uma procura constante de melhorias/otimizações do processo de injeção, visando alcançar maior nível de eficiência de recursos, qualidade de produto e redução de custos associados. Desta forma, é crucial desenvolver a capacidade de antecipação de falhas e defeitos na produção, sendo a implementação de métodos estatísticos e de simulação metodologias que contribuem para essa finalidade.

Um dos principais desafios presentes no processo é o referente à capacidade de previsão e controlo dos defeitos que tendem a ocorrer, conduzindo, conseqüentemente, à não conformidade da peça e, assim, ao sucessivo aumento da taxa de refugo, perdendo-se os vários recursos empregues na transformação. A este desafio, encontra-se associado a definição/controlo das condições de processo que influenciam diretamente a qualidade final da moldação e que, geralmente, são alcançadas por meios de abordagens experimentais de tentativa erro acarretando altos custos.

Desta forma, a fim de evitar a ocorrência de defeitos, é fundamental compreender e controlar os parâmetros do processo, sendo, neste contexto, o desenvolvimento de *softwares* de simulação numéricos uma ferramenta poderosa no direcionamento de otimização do processo, como também no apoio das várias fases de projeto. No entanto, para que os dados calculados sejam eficazes na previsão de defeitos, é necessário estabelecer métricas que definam indicadores de qualidade e que tenham capacidade de quantificar a probabilidade de ocorrência dos defeitos, bem como a sua severidade e extensão. Com a devida definição de métricas, para além de uma maior rentabilidade, fiabilidade e retorno do *software* durante as fases de projeto e de produção, será garantida uma produtividade mais elevada, menos desperdício, inspeção de qualidade menos frequente e maior estabilidade de processo. Até ao momento, as capacidades de previsão dos *softwares* não são usufruídas na sua totalidade, isto devido à carência de sensibilidade na interpretação dos resultados calculados, visto que, não se encontram associados à gravidade ou à real presença do defeito em causa.

Portanto, a dissertação tem como objetivo geral, para além da definição de métricas para a previsão de feitos estéticos, oferecendo ao utilizador informação relativa à comparação entre simulação e realidade, pretende conseqüentemente, atingir processos mais robustos, estáveis e mais eficientes, segundo uma metodologia baseada em princípios computacionais.

1.2 Objetivos

A elaboração da presente dissertação tem como objetivo estudar a capacidade de previsão de defeitos estéticos, através de modelos de simulação construídos em *softwares* de cálculo, neste caso, o Moldex3D®.

O desenvolvimento de softwares de simulação possibilitam prever o comportamento do escoamento do fundido no interior do molde, bem como a capacidade de previsão de defeitos. Porém, associar os resultados ao real aparecimento do defeito no processo trata-se ainda de uma incógnita. Desta forma, o problema surge na falta de sensibilidade de interpretação dos resultados apresentados pelo *software*, uma vez que estes, não se encontram associados à gravidade ou à real presença do defeito em causa. Esta incerteza impede uma avaliação rigorosa dos resultados por parte do utilizador, e consequentemente o não aproveitamento total das capacidades do *software*.

Para contrariar este efeito, pretende-se, então, estabelecer métricas para que com a análise de resultados aos modelos de simulação se preveja com maior exatidão a ocorrência ou não dos defeitos nas peças reais. Portanto, tendo em conta o problema, os objetivos podem ser definidos de forma sucinta nos seguintes:

- Definir métricas para os defeitos de linhas de soldadura e chupados;
- Estudar as propriedades morfológicas de defeitos estéticos em peças plásticas tendo em conta as condições de processamento;
- Entender a influência dos defeitos estéticos no processo de pintura, visto que determinadas linhas de soldadura permanecem visíveis após o respetivo processo.

A fim de atingir os objetivos definidos, inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica, com a finalidade de estudar os defeitos estéticos em causa, bem como, compreender as condições de processo com maior influência sobre os respetivos defeitos. Posteriormente, realizam-se simulações e injeção com as várias condições de processo, com a finalidade de obter peças com e sem defeitos. Seguidamente, realiza-se a inspeção realizando a ponte entre o computacional e o real, definindo-se as respetivas métricas.

Assim sendo, com a finalização deste trabalho, pretende-se oferecer ao utilizador uma maior capacidade de análise e interpretação de resultados. Consequentemente, com maior capacidade de antecipação durante as fases de projeto, afere-se adicionalmente, maior fiabilidade de produção, diminuindo as taxas de refugo e variabilidades de produção.

1.3 Metodologia

De modo a atingir os objetivos definidos, delineou-se um fluxograma de tarefas a serem desenvolvidas ao longo do projeto, representado na Figura 1.

Primeiramente será selecionada uma peça com produção em série que permita apresentar os defeitos a serem estudados. Após a devida seleção da peça, esta será fielmente replicada num modelo virtual de simulação tendo em conta todos os aspetos críticos que influenciam o processo de injeção (equipamento, material, sistema de alimentação, arrefecimento, etc). Após a modelação, inicia-se o cálculo e, posteriormente, a comparação dos resultados virtuais com os reais, tendo em conta o gráfico de queda de pressão e localização das linhas de soldadura, para efeitos de validação do modelo de simulação. De modo a validar o modelo, este tem de apresentar diferenças entre gráficos de queda de pressão inferiores a 5%, bem como igualdade na localização das linhas de soldadura. Caso contrário, é fundamental rever a fase de construção do modelo, a fim de verificar a inexistência de possíveis erros construtivos.

Posteriormente, após validação do modelo, e tendo como *input* a pesquisa bibliográfica sobre os defeitos e as condições de processo que tendem a influenciar de forma significativa os mesmos, inicia-se a produção dos *DOE's*. Estes consideram as condições de processo críticas para o defeito em causa, bem como fatores de qualidade, para posteriormente avaliar os resultados. De forma simultânea ao processo de cálculo de *DOE's*, e, tendo em conta as condições de processo definidas, inicia-se um ensaio de produção de peças sendo, à posteriori, realizada uma análise morfológica das moldações, com a finalidade de efetuar medições sobre os defeitos.

Por fim, realiza-se a comparação e análise dos resultados das medições e resultados calculados pelo *software*, com o objetivo de definir métricas para os respetivos defeitos.

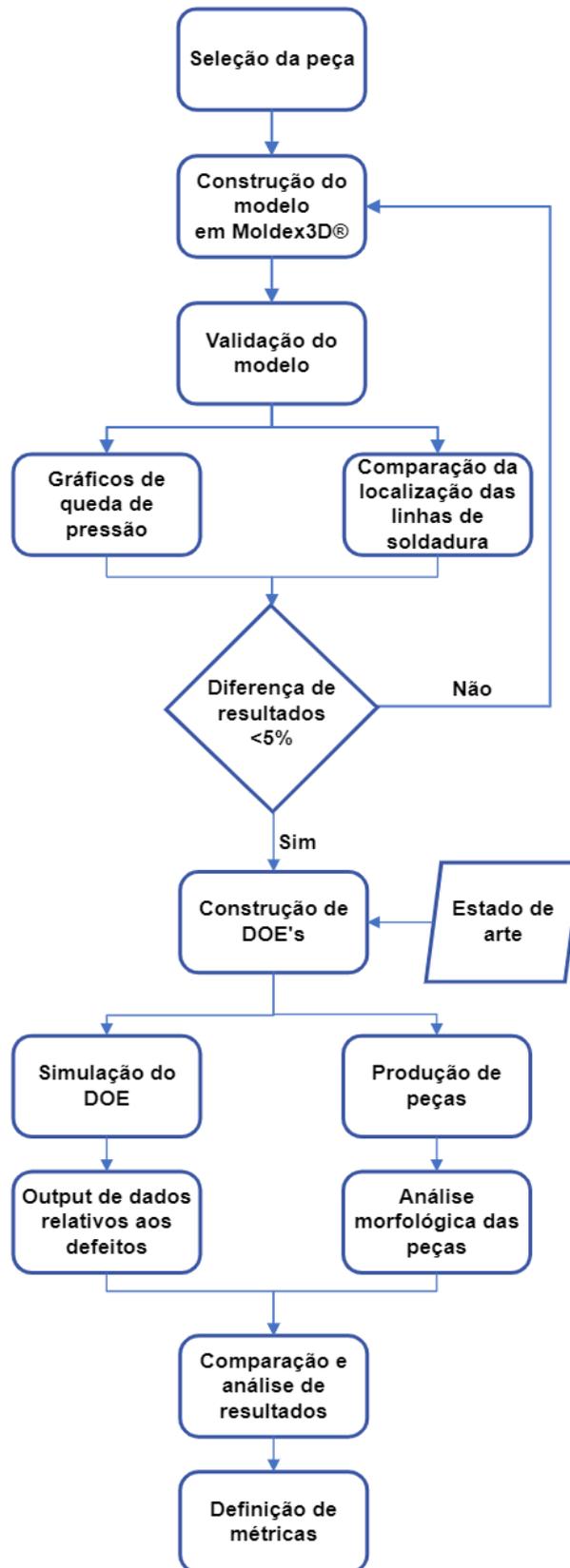


Figura 1. Fluxograma de atividades

1.4 Empresa

O grupo Fehst, fundado em 1995, resultou de um “*management buyout*” da Grundig Componentes. O grupo é constituído por várias empresas, sendo a Fehst Componentes, Lda. a maior empresa do grupo. Encontra-se situada em Braga, especializando-se na produção de sistemas e peças decorativas para o interior automóvel, sendo fornecedor para várias OEM 's, desde Mercedes, Seat, Audi, Volkswagen e Renault. Foca-se na melhoria contínua, sendo que o seu planeamento de qualidade encontra-se de acordo com as normas e requisitos da indústria automóvel. A empresa é detentora dos certificados das auditorias ISO 9001, ISO 14001 e IATF 16949 conduzidas pela AENOR certificadas pela IQNET.

A empresa apresenta uma unidade de produção constituída por várias máquinas de injeção, elétricas e hidráulicas, com capacidade de injeção até três materiais. É ainda constituída por uma linha de eletro galvanização, permitindo a cromagem de peças plásticas, uma linha de pintura flat-bed para um sistema de pintura de cura térmica e UV e linhas de montagens.

A Fehst, atualmente, oferece uma solução completa para a indústria automóvel, que inclui desenvolvimento, gestão de projetos, logística, produção e inovação sob um rigoroso sistema de gestão da qualidade [1].



Figura 2. Instalações da Empresa Fehst Componentes, Lda [1]

1.5 Estrutura da Dissertação

Por forma a clarificar o estudo desenvolvido nesta temática de dissertação o trabalho apresentado é dividido em seis capítulos.

O Capítulo 1 contextualiza o leitor relativamente à necessidade do estudo em causa, devido à falta de conexão entre o real e o virtual, bem como as vantagens que a conclusão do projeto irá promover nos processos. Define-se ainda a metodologia a seguir, de modo a alcançar os objetivos propostos com o projeto.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos fundamentais a dominar para a elaboração da dissertação. As principais temáticas abordadas são:

- O processo de injeção;
- Aspetos fenomenológicos do processo de injeção, abordando o comportamento reológico dos polímeros, o comportamento termomecânico a que o material está sujeito durante o processo e, ainda, os defeitos estéticos (definição, causa e solução);
- *Software* CAE, visto o projeto assentar sobre um *software* de modelação do processo de injeção, abordando um contexto histórico referente à evolução e uma introdução ao Moldex3D®;
- Método dos Elementos Finitos, visto retratar a base de funcionamento do *Moldex3D*®.

No Capítulo 3 inicia-se o trabalho referente à parte de modelação, isto é, construção do modelo no Moldex3D®, e a validação do respetivo modelo tendo como comparação dados da evolução da queda de pressão ao longo do processo de injeção e ainda a localização das linhas de soldadura.

No Capítulo 4 efetua-se a componente estatística do trabalho, isto é, construção dos *DOE's* tendo em conta os fatores de controlo e os fatores de qualidade, sendo *inputs* dos conceitos teóricos abordados no capítulo 2.

No Capítulo 5 executa-se a componente prática, tendo em conta os resultados estatísticos do Capítulo 4. Realiza-se a produção de peças tendo em conta o resultado de *DOE's*, define-se a técnica de avaliação, de modo a ser possível analisar os defeitos estéticos e, por fim, a análise e discussão de resultados.

No Capítulo 6 é efetuado um balanço geral de todo o projeto e apresentam-se as conclusões determinadas com a realização do trabalho.

Capítulo 2 – Conceitos teóricos

2.1 Moldação por injeção

A origem do processo de moldação por injeção remonta ao final do século XIX, onde em 1872 os irmãos Hyatt patentearam a primeira máquina. Esta consistia num cilindro aquecido, que provoca a fusão do material polimérico. De seguida, um pistão atuava sobre o fundido provocando o seu deslocamento do cilindro para o molde. Para aumentar a eficácia de homogeneização de fundido, era inserido um torpedo no interior do cilindro para promover a mistura distributiva.

Com o avançar dos anos verificaram-se evoluções nas tipologias das máquinas, sendo que, os principais marcos ocorreram no século XX, onde nos anos 40 se desenvolveu a primeira injetora hidráulica. Em 1951, William H. Willert patenteou a máquina de injeção com o parafuso alternativo, que permitiu uma maior capacidade de homogeneização em comparação com a utilização de um torpedo. A partir dos anos 80, os avanços mais significativos foram dados na computadorização do processo, bem como no desenvolvimento de técnicas de injeção não convencionais. Em 1988 surgiu a primeira máquina de injeção totalmente elétrica [2][3].

A moldação por injeção é, atualmente, um dos principais processos de transformação de materiais poliméricos, sendo que, aproximadamente 30% do plástico anualmente processado é realizado através desta tecnologia. O grande sucesso deve-se à elevada reprodutibilidade, à precisão dimensional, a diversos acabamentos superficiais e à grande flexibilidade em termos geométricos e dimensionais, apresentando moldações em gamas compreendidas entre 1 mg a 100 kg [2][4][5].

2.1.1 O ciclo de injeção

A moldação por injeção é definida por um processo cíclico e dinâmico, sendo que, o conjunto de operações necessário à produção de uma moldação define-se pelo ciclo de moldação, como ilustrado na Figura 3. A duração do ciclo é dependente da geometria, dimensão da moldação e condições de processo, todavia, a otimização do ciclo é fundamental para assegurar a competitividade económica do processo [2].

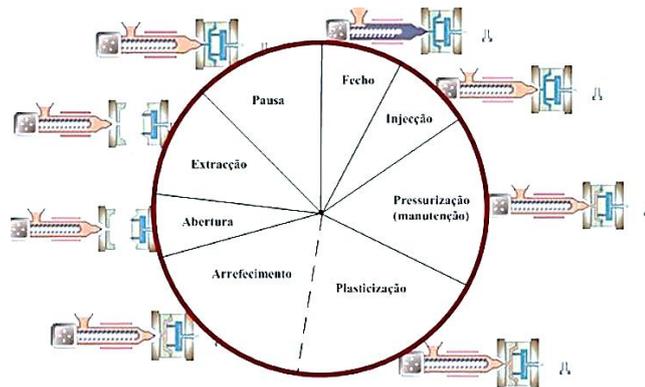


Figura 3. Ciclo de injeção [2]

O ciclo inicia com o fecho e trancamento do molde, Figura 4, devendo este ocorrer no mínimo tempo possível. Todavia, a otimização da duração da fase encontra-se limitada devido à inércia das massas a movimentar, à possibilidade de ocorrência de movimentos internos no molde, às capacidades técnicas do equipamento de injeção, ao curso de fecho e à necessidade da velocidade na zona final de encosto das duas partes do molde ser reduzida para não provocar danos nas superfícies de ajustamento.

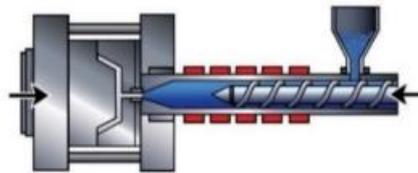


Figura 4. Fecho e trancamento do molde [6]

Após trancamento do molde, segue-se a fase de enchimento onde o fuso adquire um movimento axial, exercendo uma pressão sobre o fundido acumulado, forçando a sua entrada na cavidade, Figura 5.

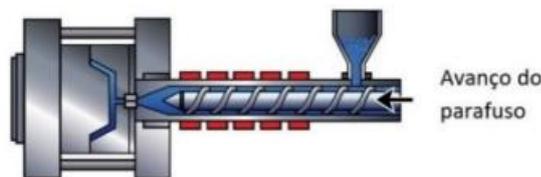


Figura 5. Fase de injeção [6]

A dinâmica da fase de enchimento é considerada a principal causa no possível desenvolvimento de defeitos na peça final. O objetivo em todas as fases do ciclo de injeção é otimizar para diminuir o tempo de ciclo associado. Porém, deve ser adotado um perfil de velocidades moderado, para que seja atingido um compromisso entre a qualidade da peça e o tempo de enchimento. Velocidades de injeção elevadas tendem a causar efeitos de jato e degradação devido às elevadas temperaturas desenvolvidas por efeitos do atrito interno do próprio fundido. Por outro lado, velocidades baixas manifestam-se na

necessidade de maiores pressões envolvidas, isto devido ao progressivo arrefecimento da peça e sistema de alimentação [2][5].

No decorrer da respetiva fase, o fundido em contacto com as paredes do molde tende a arrefecer rapidamente, originando uma camada de material solidificado (casca), enquanto o núcleo permanece fundido, como verificado na Figura 6. Em consequência do efeito térmico, a continuação do enchimento é dada pelo núcleo, onde o material é forçado a fluir, sendo que, devido à dinâmica de escoamento dos polímeros, o material na frente de fluxo é projetado contra a superfície moldante [6][7].

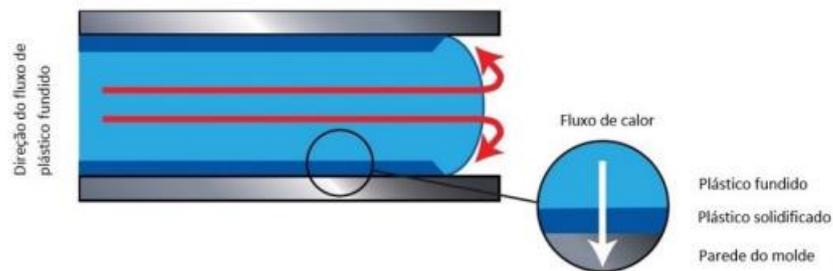


Figura 6. Fluxo em fonte e direção da transferência de calor [6]

Posteriormente, quando o nível de enchimento da cavidade atingir um volume igual ou superior a 95%, é iniciada a fase de pressurização ou compactação, indicada na Figura 7.

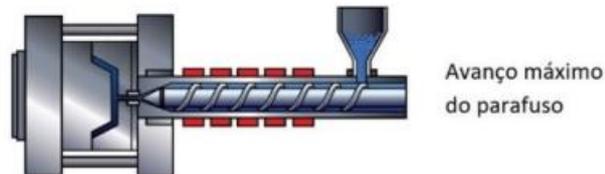


Figura 7. Fase de pressurização ou compactação [6]

Esta etapa encontra-se associada a uma alteração do regime de funcionamento, onde ocorre a passagem de uma fase de controlo de velocidade de injeção (fase dinâmica) para uma fase de controlo de pressão (fase estática). Desta forma, o objetivo da aplicação de uma segunda pressão é compensar o efeito da contração do volume da peça, visto que os plásticos tendem a contrair cerca de 25% devido à diminuição da massa volúmica durante a fase de arrefecimento. Esta fase dá-se por terminada quando ocorrer a solidificação dos pontos de ataque, de modo a inibir o refluxo de material. Durante o decorrer da solidificação dos ataques, a pressão exercida sobre o fundido diminui sucessivamente, pois a capacidade de transferência de pressão decresce com o aumento da percentagem de material solidificado [2][3][5][6].

Após o final da pressurização, enquanto o arrefecimento continua a decorrer, inicia-se, simultaneamente, a fase de plasticização ilustrada na Figura 8.



Figura 8. Fase de plasticização em simultâneo com a fase de arrefecimento [6]

Nesta fase, o fuso através de movimentos rotacionais, promove a fusão de material, depositando-o progressivamente à sua frente. Com o acumular de material fundido, o fuso começa a recuar, isto devido à pressão exercida pelo mesmo, garantindo o volume necessário de material fundido para o próximo ciclo. A fase de arrefecimento é caracterizada pela transferência de calor da peça para o molde até que esta alcance uma temperatura que lhe confira resistência suficiente para suportar a extração. O tempo da respetiva fase é dependente da eficiência do sistema de refrigeração, da geometria e espessura da peça. Esta fase é crítica para o tempo total de ciclo, visto ser a mais demorada, sendo também crucial para a qualidade final da peça. Tipicamente, maiores tempos de arrefecimento permitem uma maior taxa de relaxação de tensões e por consequência, menor grau de empenos. Assim, deve ser obtido um equilíbrio entre tempos de ciclo e qualidade da moldação.

Por fim, Figura 9, ocorre a abertura do molde, extração da peça e pausa, tratando-se esta última, do período decorrido entre o fim da extração e o início do próximo ciclo. Este tempo tende a ser praticamente nulo quando a máquina se encontra a funcionar em regime automático [2].

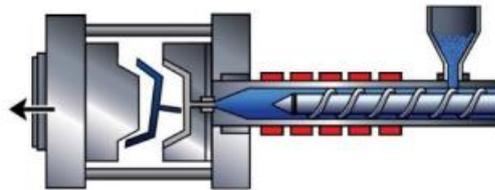


Figura 9. Abertura do molde e extração [6]

2.1.2 Máquina de injeção

As máquinas de injeção são constituídas tipicamente por quatro unidades funcionais, como ilustrado na Figura 10:

- Unidade de injeção/plasticização: responsável pela transporte, aquecimento, plasticização, homogeneização, injeção e pressurização;
- Unidade de fecho: garante a fixação, movimentação e fecho do molde, como também aciona a extração;
- Unidade de potência: encarregue de fornecer energia aos diversos sistemas da máquina;
- Unidade de Controlo/Comando: promove a interface máquina-operador, sendo possível controlar e monitorizar as variáveis do processo [2].

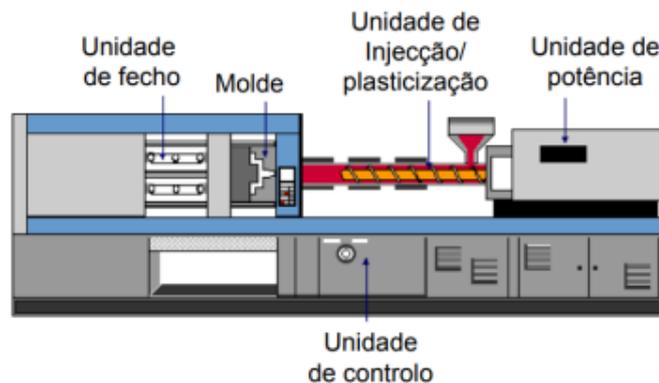


Figura 10. Unidades funcionais do equipamento de injeção [8]

2.1.3 Gráficos Pressão vs. Tempo

Durante o ciclo de moldação e tendo em conta a capacidade técnica da máquina de injeção, relativa à unidade de controlo/comando, é possível monitorizar a evolução da pressão ao longo do decorrer do ciclo [5]. A monitorização pode ocorrer no cilindro hidráulico do fuso ou no molde, sendo que, para estudar a evolução da pressão na superfície moldante é necessário, tipicamente, a incorporação de sensores piezoelétricos. Porém, quanto mais distantes estes estiverem da zona de ataque, menor será a informação recolhida, como referido na Figura 11, onde se verificam evoluções distintas tendo em conta as diferentes localizações do sensor [2][9].

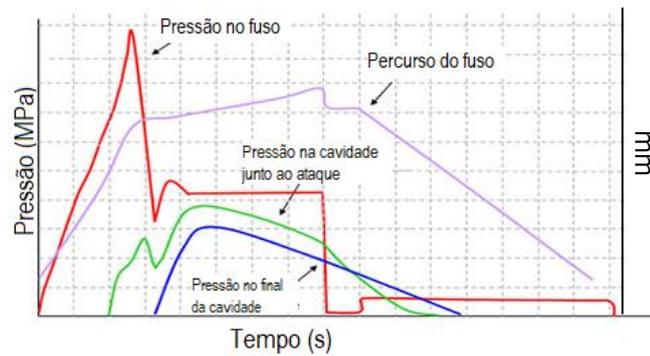


Figura 11. Evolução da Pressão [8]

Com a monitorização da pressão, é possível identificar as várias fases do processo de injeção, prever o ponto de comutação ideal dado na transição da fase de injeção para a fase de compactação e ainda, identificar possíveis defeitos através da comparação entre as curvas ideais do processo em diferentes moldações [5].

Por outro lado, a utilização destes dados tem como objetivo validar o modelo construído em Moldex3D®. Deste modo, obtendo-se uma diferença analítica reduzida entre as duas curvas, confere-se que a simulação calcula de forma praticamente equivalente o processo real, revigorando as capacidades de simulação e de previsão de defeitos antecipadamente. Visto que o molde em questão não apresenta sensores piezoelétricos, a leitura de pressão será dada no cilindro hidráulico, como ilustrado na Figura 12.

Na Figura 12, é possível identificar duas fases do ciclo de injeção, sendo elas a fase de injeção e pressurização. Durante o intervalo A é iniciada a fase de injeção até a cavidade atingir um volume de aproximadamente 95%. Após isso, ocorre a comutação para a fase de pressurização, onde se promove um esforço pré-especificado sobre o material injetado. Contudo, durante esta fase, ocorrem duas etapas: primeiro, a compactação do material devido à contração do mesmo até ser atingido o pico de pressão e, posteriormente, a execução da segunda pressão. Esta ocorre, na grande maioria, de forma escalonada devido à progressiva solidificação do ataque, diminuindo assim a capacidade de transferência de pressão para a peça [2][5].

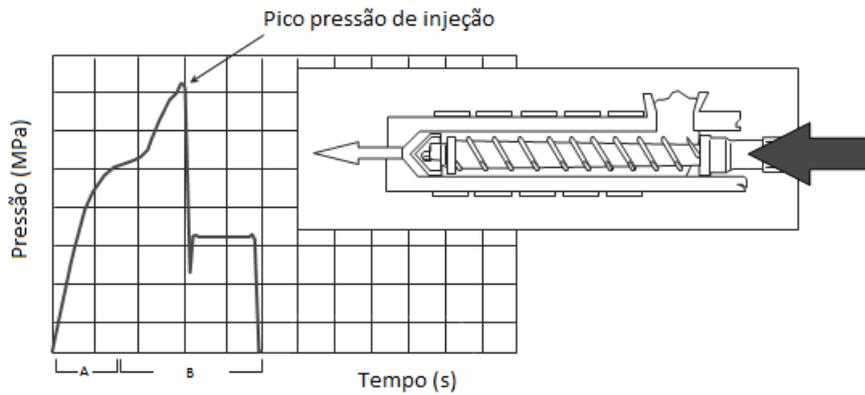


Figura 12. Evolução da pressão de injeção no fuso [10]

Como a leitura de pressão no equipamento de injeção para efeitos de comparação/validação é obtida no cilindro hidráulico, encontra-se associado um fator de 10 entre a pressão hidráulica e a pressão na ponteira do fuso sobre o fundido. Isto deve-se à relação existente entre a área do pistão e do parafuso, como ilustrado na Figura 13, sendo a pressão efetiva sobre o material cerca de 10 vezes superior à pressão de injeção de ajuste (hidráulica) [2].

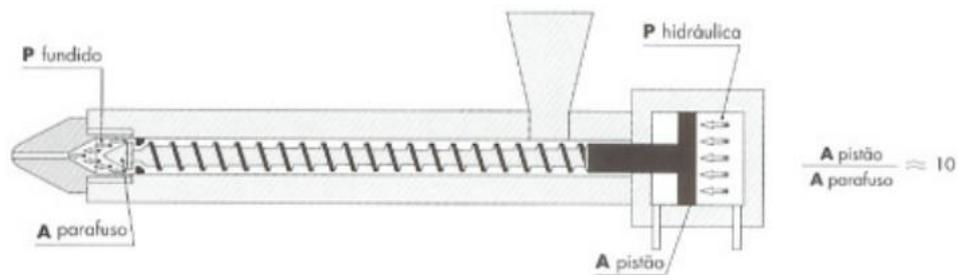


Figura 13. Pressão hidráulica vs. pressão efetiva sobre o material [2]

2.2 Aspectos fenomenológico do processo de moldação por injeção

2.2.1 Reologia do material

Por definição, reologia é a ciência da deformação e do fluxo de matéria, neste caso, de polímeros. As propriedades reológicas “governam a forma” como o fundido se deforma e flui quando sujeito a uma força aplicada que implique o seu escoamento. Desempenha, por isso, um papel fundamental na caracterização do processo de moldação por injeção, onde as propriedades reológicas, térmicas e físicas, determinam a capacidade de preenchimento da cavidade [11].

Os materiais poliméricos exibem propriedades híbridas entre um fluido viscoso e um sólido elástico, como exemplificado na Figura 14. Os fluidos viscosos referem-se a materiais que não apresentam uma forma definida, pelo que, sob ação de forças exteriores, deformam-se irreversivelmente. Não detêm assim, capacidade de armazenamento de energia dada durante a aplicação da força, sendo

esta libertada sob a forma de calor. Por outro lado, o sólido elástico tende a deformar sob aplicação de uma força, porém, apresenta capacidade de armazenar energia e assim, por consequência, utiliza a energia para voltar ao seu estado inicial. Assim sendo, os polímeros são classificados como materiais viscoelásticos, apresentando uma recuperação parcial da deformação [2][6].

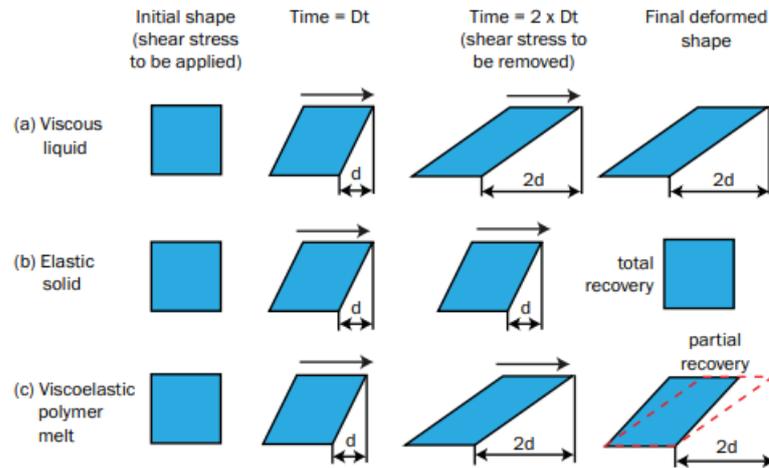


Figura 14 Comportamento viscoelástico dos polímeros [6]

Os materiais poliméricos, no estado fundido, são ainda caracterizados por possuírem um comportamento não-Newtoniano, mais precisamente, pseudoplástico. A viscosidade nestes fluidos é dependente de quatro fatores: velocidade de corte, temperatura, pressão e massa molecular [11]. O conceito de viscosidade, define a resistência do fluido ao escoamento, sendo descrita pelo rácio entre tensão de corte (τ) e velocidade de corte (γ), como indicada na equação 1.

$$\eta \text{ (Pa.s)} = \frac{\tau \text{ (Pa)}}{\gamma \text{ (s}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

Estes dois parâmetros, que definem a viscosidade, são determinados através de ensaios reológicos decorridos entre duas placas, sendo a tensão de corte definida pela força necessária a aplicar sobre uma determinada área para deformar o material. A velocidade de corte indica a variância de velocidades ocorrida na secção transversal do perfil [12].

Deste modo, tendo em conta o comportamento pseudoplástico, os polímeros apresentam uma relação entre a velocidade e a tensão de corte não linear. Tal comportamento, traduz-se numa diminuição da viscosidade do fluido com um sucessivo aumento da velocidade de corte, como apresentado na Figura 15, consequência do progressivo alinhamento das moléculas na direção de fluxo, promovendo uma diminuição da sua resistência [11].

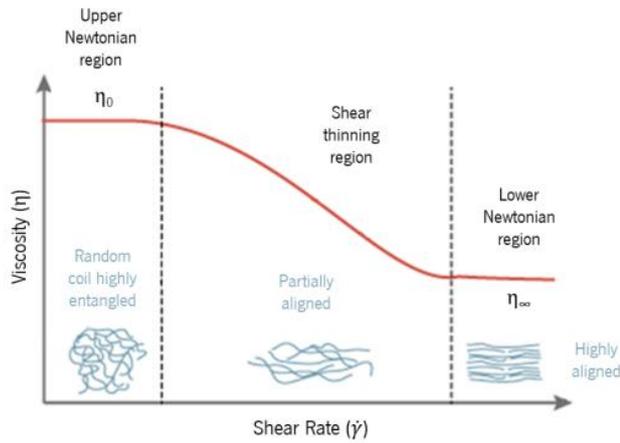


Figura 15. Comportamento da viscosidade em função da velocidade de corte [11]

Existem vários modelos que tendem a descrever o comportamento pseudoplástico, sendo o modelo de Cross-WLF o mais utilizado para simulação do processo de injeção. Este modelo encontra-se descrito nas equações 2, apresentando sete parâmetros de caracterização do material.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{(1-n)}}$$

$$\eta_0 = D_1 \exp\left(\frac{-A_1(T - T_c)}{A_2 + (T - T_c)}\right) \quad (2)$$

$$T_c = D_2 + D_{3p}$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_{3p}$$

O modelo contabiliza o efeito da velocidade de corte, temperatura e pressão sobre a viscosidade, sendo $D_1(Pa.s)$ a viscosidade às condições de referência, $D_2 (K)$ tipicamente toma o valor da temperatura de transição vítrea, A_1 e $\tilde{A}_2(K)$ tratam-se de fatores dependentes de temperatura e D_{3p} descreve o efeito de pressão na viscosidade, sendo (p) o valor de pressão atuante sobre o fundido [13]. No entanto, no *Moldex3D®*, o referido modelo é o selecionado, porém não contabiliza o efeito de pressão sobre a viscosidade durante o ciclo de injeção, devido à dificuldade reológica do cálculo.

2.2.2 Comportamento termomecânico

O ambiente termomecânico desenvolvido durante o ciclo de injeção condiciona o desenvolvimento da microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades visuais e mecânicas das peças. Deste modo, as velocidades e tensões de corte caracterizam o ambiente mecânico, a temperatura define o ambiente térmico, e por fim a viscosidade, referente à combinação entre os dois ambientes, devido à dependência de ambos [14].

O ambiente termomecânico, representado na Figura 16, inicia-se pela formação da estrutura laminada casca-núcleo. Durante a fase de injeção, o material em contacto com as paredes do molde, tende a solidificar rapidamente originando a casca. Inicialmente, esta apresenta uma espessura reduzida, contudo, com o decorrer do arrefecimento, a espessura aumenta gradualmente. Consequentemente, a velocidade de transferência de calor diminui até ser atingido o equilíbrio entre o calor perdido por condução e o aumento do calor associado ao ambiente térmico. A camada solidificada reduz a área de secção transversal disponível para o escoamento de fundido, apresentado por efeito, variações no perfil de velocidades e no ambiente termomecânico [6][15].

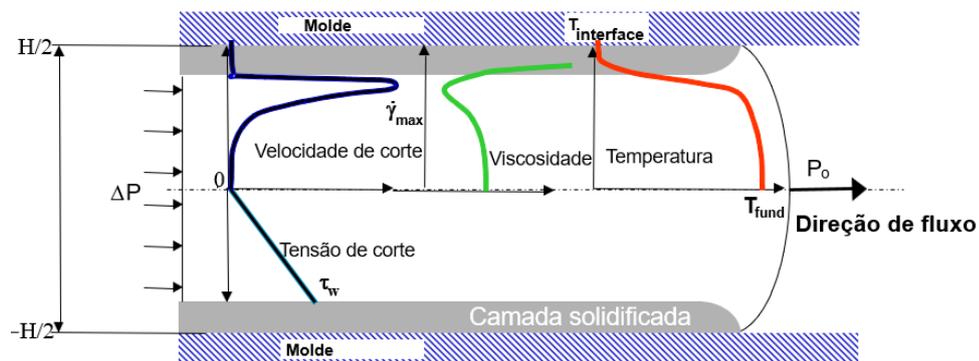


Figura 16. Comportamento termomecânico [14]

Deste modo, tendo em conta a formação da casca, as reduzidas propriedades de condução térmica e o efeito de dissipação viscosa, desenvolvem-se gradientes de temperatura. A temperatura decresce com o nível de proximidade às paredes do molde, sendo que o centro apresenta temperatura superior à definida no equipamento de injeção devido ao efeito do atrito interno.

Por outro lado, relativamente ao ambiente mecânico, verificam-se elevadas velocidades de corte junto à camada solidificada, tendendo para zero com o aproximar do centro do canal. Estas devem-se ao gradiente de velocidades entre camadas adjacentes do material. Deste modo, uma vez que não existem movimentos relativos entre camadas sucessivas no centro do canal, as velocidades de corte tendem para zero, consequência da velocidade de escoamento constante, como é possível verificar na Figura 17. O contrário ocorre junto à camada solidificada, visto que ocorre a interação entre o fundido, com velocidade associada, e a casca no estado estático, resultando em elevadas velocidades de corte [6].

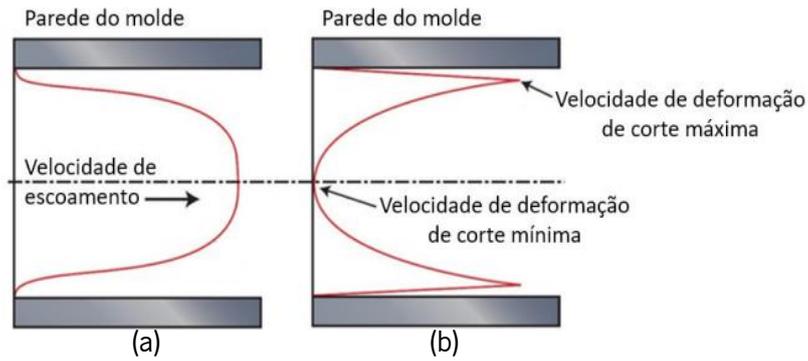


Figura 17. Perfil de velocidades (a) de escoamento; (b) de corte [6]

Como resultado da combinação entre o perfil de velocidades de corte e temperatura de fundido, derivam perfis de viscosidade. Na Figura 16 confere-se que a viscosidade tende para infinito na camada solidificada, porém, no ponto onde a velocidade de corte e a temperatura são máximas, a viscosidade apresenta o seu mínimo, por consequência do comportamento pseudoplástico. Com o aproximar ao centro do canal, as velocidades de corte apresentam tendência a diminuir, sendo que a viscosidade se uniformiza, apresentando apenas dependência do ambiente térmico [6][15].

Tendo em conta os fenômenos mecânicos e térmicos ocorridos, a orientação e a eficácia de transferência de calor diversificam-se ao longo da secção transversal. Na camada solidificada, a casca apresenta baixo nível de orientação molecular, pois refere-se ao primeiro material a contactar as paredes do molde. No entanto, a sub-casca, camada solidificada após a casca, é submetida ao efeito de elevadas velocidades de corte, sendo que, as moléculas orientam-se na direção de fluxo e, devido às elevadas taxas de arrefecimento, as moléculas tendem a preservar o respetivo alinhamento. Porém, as velocidades de corte e taxas de arrefecimento tendem a diminuir com o aproximar ao centro do canal, implicando menor orientação e maior capacidade de relaxação molecular. Derivam, deste modo, gradientes de orientação, que implicam o desenvolvimento de tensões residuais, e, como resultado, o surgimento de contrações e empenos na moldação [6]. O material orientado na casca apresenta maior tendência para contrair, contudo, a contração é limitada pelo núcleo, desenvolvendo-se tensões residuais compressivas sobre o mesmo. No núcleo, a contração é limitada pela casca já solidificada, originando tensões residuais de tração sobre a casca. A junção destas forças, quando não em equilíbrio, provocam chupados, empeno e redução das propriedades mecânicas [6].

2.2.3 Defeitos estéticos

O processo de injeção permite uma elevada produtividade de peças com geometria complexa, porém, a qualidade do produto obtido depende fortemente da otimização das condições de injeção e da concepção do molde. Deste modo, podem ser originados vários defeitos durante o processo, comprometendo-se assim as propriedades mecânicas e estéticas da peça. Entre os defeitos típicos que afetam a qualidade das peças injetadas encontram-se as rebarbas, chupados, linhas de soldadura, marcas de fluxo, hesitações, prisões de ar e empenos[16].

2.2.3.1 Linhas de soldadura

O percurso de fundido no interior da cavidade é dependente de vários fatores associados, desde o número de ataques, a geometria, a dimensão e a presença de insertos na cavidade. Estes afetam ou alteram significativamente o trajeto, contribuindo para a divisão de fundido. Por consequência da divisão, as convergências seguintes das frentes de fluxo originam a linha de soldadura, definindo-se assim como a união de duas ou mais frentes de material, como ilustrado na Figura 18. O efeito de *race-tracking*, causado por variações de espessura, e o efeito de jato originam igualmente este efeito na moldação [3][17].

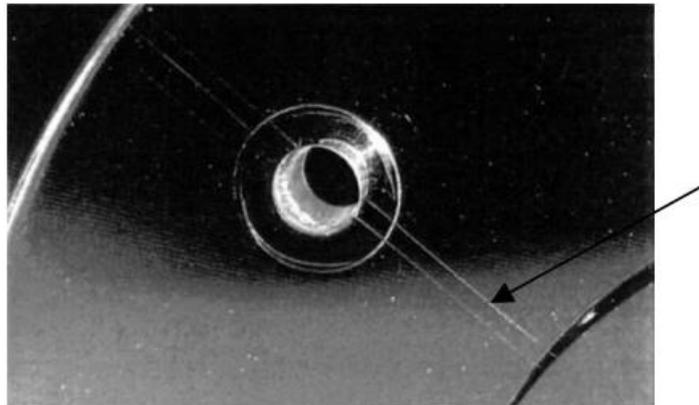


Figura 18. Linhas de soldadura causadas por efeitos geométricos [5]

A presença de linhas de soldaduras afetam negativamente a qualidade superficial e as propriedades mecânicas, visto que, a junção de duas ou mais frentes de fluxo apresentam limitações quando submetidas a esforços mecânicos [18]. A limitação de propriedades da linha é atribuída a três fatores principais, sendo estes: (1) a junção incompleta das frentes de fluxo; (2) a orientação molecular solidificada na direção paralela à interface de união devido ao escoamento em forma de fonte, promovendo um entrelaçamento ou uma difusão molecular insuficiente entre as frentes e, por fim; (3) a formação de um entalhe em V junto à superfície moldante [19][20][21][22].

O efeito *V-notch* é o principal fator que possibilita a visualização da linha de soldadura, isto devido à formação de um entalhe, como ilustrado na Figura 19. A sua origem deve-se à possível retenção de gases entre as paredes do molde e a frente de fluxo ou devido ao fenómeno de contração volumétrica ocorrida durante a fase de arrefecimento [23]. Além disso, este efeito origina uma elevada concentração de tensões, com tendência a serem libertadas num processo à posteriori da injeção [24].

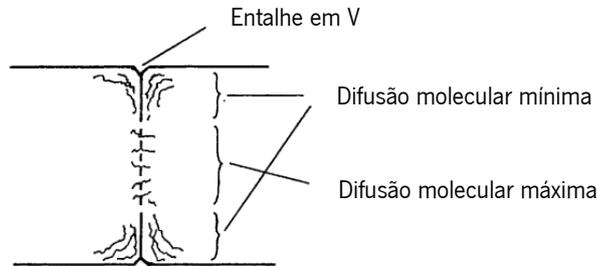


Figura 19. Linha de soldadura [19]

Durante a fase de injeção, o escoamento decorre ao longo do comprimento sendo que, na zona de interface entre as frentes de fundido, o fluxo altera a direção de escoamento, movendo-se na direção da altura da cavidade, como visível na Figura 20. Durante este período, o tempo de contacto entre material fundido no núcleo é maior, promovendo a maior capacidade de difusão molecular. Por outro lado, na camada de material junto à superfície moldante, não só o tempo de contacto entre as respetivas frentes é de menor duração, como também apresenta uma maior taxa de arrefecimento, proporcionado, deste modo, menor capacidade de difusão molecular. Desta forma, a variação da capacidade de difusão molecular ao longo da espessura da linha, como se verifica na Figura 19, promove a uma divergência de propriedades, tendendo a diminuir com a aproximação à periferia [23].

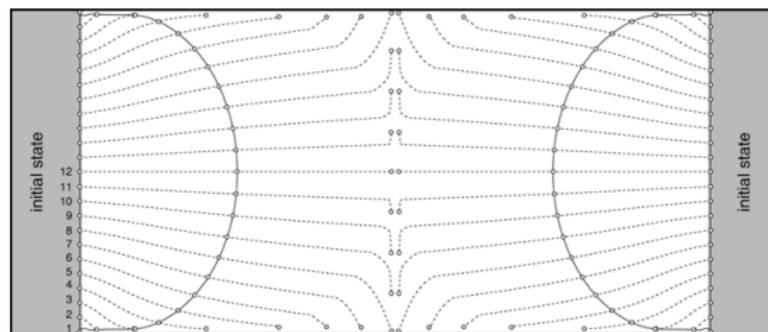


Figura 20. Trajetória de fundido durante a interface entre frentes de fluxo [23]

A qualidade da linha de soldadura varia conforme as condições de processamento e as diferentes matérias-primas, sendo as variáveis operatórias o principal alvo a alterar para se obter linhas de soldadura com melhor qualidade estética e mecânica, todavia, o efeito estará sempre presente na peça [18].

De acordo com um estudo realizado pela Covestro AG [25] com recurso a provetes de Policarbonato (Makrolon® 2558 PC), é possível verificar o impacto da pressão de compactação, da temperatura do molde e de fundido nas propriedades mecânicas da linha de soldadura, apresentado na Figura 21.

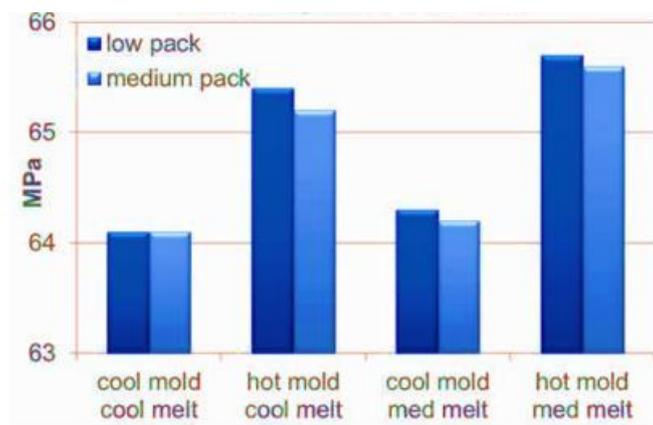


Figura 21. Ensaio de tração para análise do impacto das condições de processamento nas linhas de soldadura [25]

Em primeira análise, verifica-se que a pressão de compactação não apresenta uma influência significativa nas propriedades mecânicas da linha de soldadura, sendo importante referir que a escala do gráfico varia apenas entre 63 a 66MPa. Tendo por base a literatura, o fenómeno da pressão nas propriedades das linhas difere bastante, sendo que vários autores afirmam que a segunda pressão melhora a qualidade final da linha [19][26], porém outros discordam do respetivo efeito [25][27][24], sendo este fator dependente de inúmeras variáveis associadas, desde o material, a geometria, a dimensão e proximidade do ataque à linha.

A temperatura trata-se do principal fator que influencia significativamente as propriedades da linha de soldadura, como se verifica na Figura 21 [25][27]. Com o aumento da temperatura de fundido, as moléculas apresentam maior capacidade de mobilidade, promovendo isto, a maior difusão e entrelaçamento, contribuindo para melhores propriedades finais da linha de soldadura. Porém, segundo a Figura 21, o aumento da temperatura do molde, de forma individual, promove uma maior variação das propriedades da linha de soldadura, ao contrário da temperatura de fundido. O resultado da combinação entre baixas temperaturas do molde e elevadas temperaturas de fundido, anula o efeito de maior

capacidade de difusão e entrelaçamento das duas frentes de fundido, devido às elevadas velocidades de arrefecimento [27][28].

Tendo ainda em consideração o estudo apresentado na Figura 21, verifica-se que o fator mais importante para a melhoria das propriedades mecânicas da linha de soldadura, é o aumento da temperatura do molde. O efeito deve-se ao desenvolvimento diferente da microestrutura casca-núcleo e da orientação molecular. Com o aumento da temperatura do molde, a espessura da casca diminui, sendo que a sub-casca e o núcleo aumentam a sua espessura, proporcionando a melhoria das propriedades mecânicas da linha de soldadura. Visto a casca retratar a camada com menores propriedades mecânicas, a sua redução de espessura proporciona o aumento das mesmas. Isto, deve-se ao facto das restantes camadas, com maiores propriedades mecânicas (sub-casca e núcleo) terem aumentado a espessura. Deste modo, é essencial atingir um equilíbrio entre as duas temperaturas para obter melhores propriedades da linha e garantir a qualidade da peça [25][29][30].

A visibilidade da linha encontra-se associada à profundidade e largura do *V-notch*, ilustrado na Figura 22, sendo condicionado pelas condições de processamento.

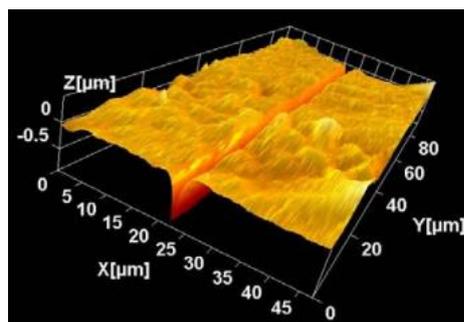


Figura 22. Superfície da linha de soldadura através de microscopia de força atômica (AFM) [24]

Tendo em conta a largura da linha de soldadura, verifica-se na Figura 23 que a velocidade de injeção, temperatura do molde e de fundido conduzem à diminuição da largura. Contudo, a variável de processo mais significativa para promover este efeito é a temperatura do molde, reduzindo drasticamente a largura com sucessivos aumentos de temperatura. Para a obtenção dos dados indicados, o autor do estudo utilizou provetes de polipropileno (PP) e de polietileno de alta densidade (HDPE) [27].

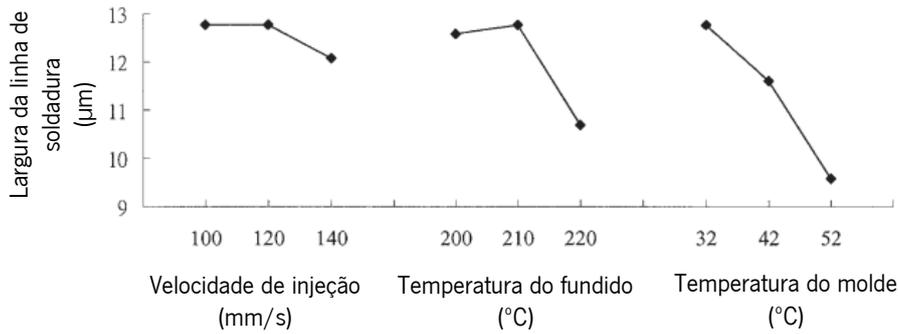


Figura 23. Efeito da velocidade de injeção, temperatura de fundido e do molde na largura da linha de soldadura [27]

Relativamente à profundidade da linha, de acordo com a Figura 24, observa-se que entre a temperatura do molde e velocidade de injeção, a temperatura diminui a profundidade para aproximadamente metade da inicial. Destaca-se assim, a temperatura do molde como o fator de maior influência, quando comparado à velocidade de injeção. O estudo assinalado foi realizado num processo de microinjeção com poliestireno (PS) [24].

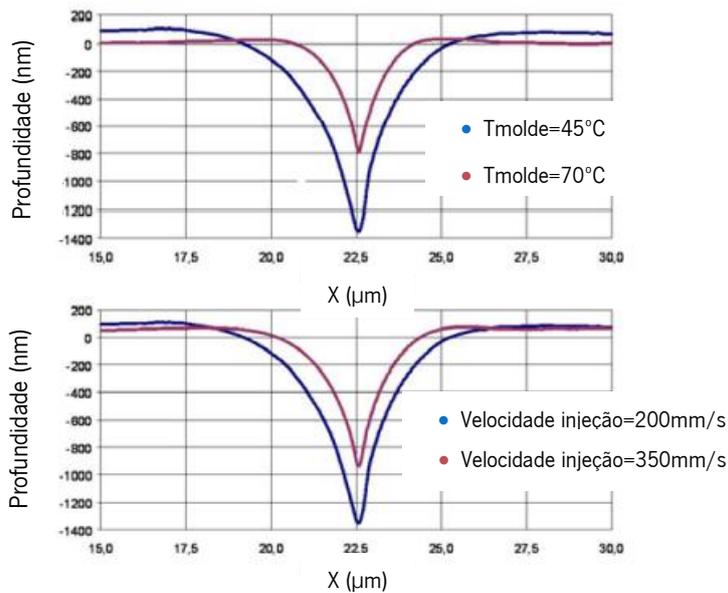


Figura 24. Efeito da temperatura do molde e velocidade de injeção na profundidade da linha de soldadura [24]

Portanto, de acordo com os dados anteriores, é possível verificar que a temperatura do molde, temperatura de fundido e velocidade de injeção promovem uma linha de soldadura com capacidades mecânicas e estéticas superiores, respetivamente. Além disso, providenciar uma saída de gases na respetiva zona de união provoca a expulsão de gases acumulados e, por consequência, uma eliminação ou diminuição do efeito *V-notch* [31][32].

As linhas podem ser classificadas tendo em conta o ângulo das frentes de fluxo após união, como apresentado na Figura 25. Estas diferenciam-se como sendo linhas de soldadura ou de fluxo, destacando-se pelas diferentes propriedades mecânicas [17].

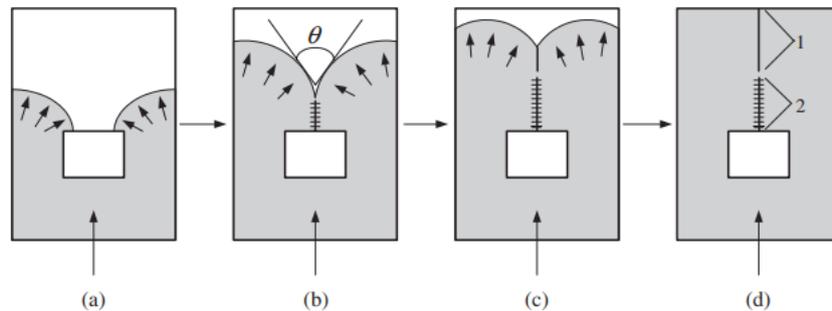


Figura 25. Formação de linhas de soldadura: (a) aproximação das frentes de fluxo; (b) formação da linha de soldadura com determinado ângulo de união; (c) formação da linha de fluxo; (d) 1: linha de fluxo; 2: linha de soldadura [17]

O ângulo de união influencia significativamente as propriedades, visto que, afeta o grau de difusão molecular e a capacidade de entrelaçamento molecular na linha. Por consequência, quanto maior o ângulo, melhores são as suas propriedades. Desta forma, um ângulo de união inferior a 135° , tipicamente, dá origem a linhas de soldadura visíveis, tendo estas, como referido anteriormente, propriedades mecânicas inferiores, resultado da menor capacidade de difusão e entrelaçamento molecular. Porém, ângulos superiores a 135° formam linhas de fluxo com propriedades estéticas e mecânicas superiores [17].

A posição e o ângulo da linha de soldadura podem sofrer ligeiras alterações tendo em conta as condições de processamento, como ilustrado na Figura 26. No entanto, para alterações mais significativas deve-se proceder a correções no molde, como por exemplo, alteração dos pontos de ataque.

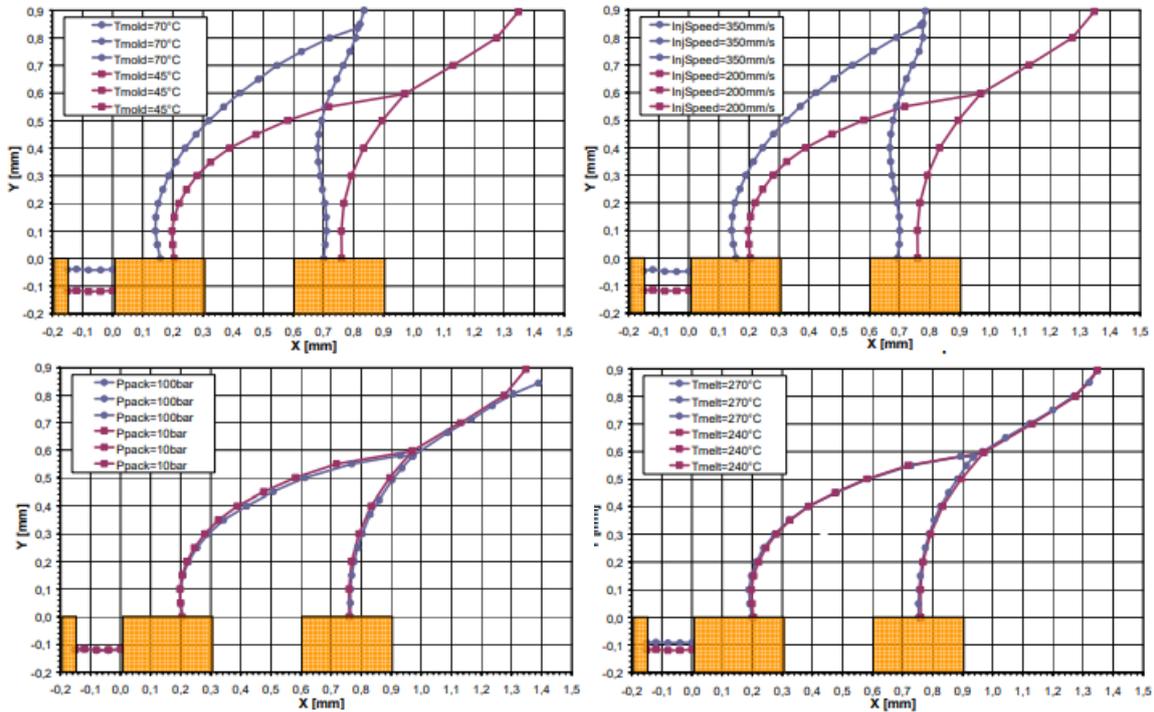


Figura 26. Posição da linha de soldadura tendo em conta as condições de processamento [24]

Analisando a Figura 26, verifica-se que, o aumento da temperatura de molde e da velocidade de injeção alteram ligeiramente a posição final da linha de soldadura. Por outro lado, o aumento da pressão de compactação e da temperatura de fundido não promovem qualquer desvio na linha de soldadura [24]. Porém, este fenómeno é apenas vantajoso se a respetiva linha se mover para uma secção de geometria diferente, caso contrário, não há alterações nas propriedades finais da peça.

Contudo, ao longo da revisão teórica sobre linhas de soldadura, observam-se diferentes conclusões. Esta variação de resultados deve-se à análise de diferentes matérias-primas e geometrias, induzindo assim, em diferentes repostas para os mesmos fatores de processamento [28].

2.2.3.2 Chupados

Os chupados, apresentado a título de exemplo na Figura 27, podem ser descritos como uma depressão ou uma reentrância na superfície da peça moldada, resultado de uma contração térmica localizada, ocorrida durante a fase de arrefecimento. Geralmente, este tipo de defeitos surge em áreas de maior concentração de material, devido à presença de gradientes de espessura ou zonas com reforços (por exemplo nervuras) [33][34]. Por motivo de uma maior quantidade de massa a ser arrefecida, a área é definida pela literatura como aumento de massa térmica [35].



Figura 27. Chupados [6]

Durante a fase de enchimento, o material que contacta inicialmente as paredes do molde, arrefece imediatamente, dando origem à casca. O núcleo permanece no estado fundido, desenvolvendo-se gradientes de temperatura e de massa específica entre a casca e o núcleo da peça, como verificado na Figura 28. Como resultado do arrefecimento não uniforme, a casca apresenta uma massa específica inferior, proporcionando uma maior contração volumétrica localizada. Consequentemente, desenvolvem-se tensões de compressão sobre a casca e tensões de tração no núcleo, originando, deste modo, o chupado na superfície [33].

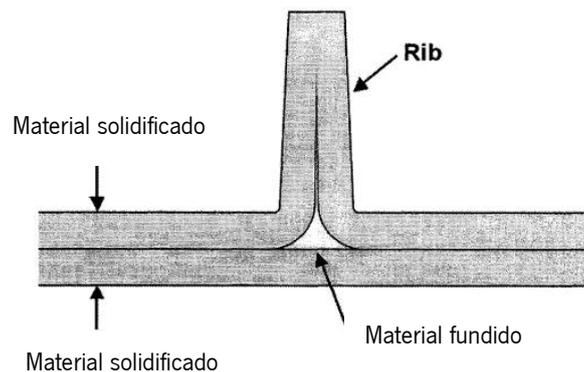


Figura 28. Aumento da massa térmica originado por um elemento de reforço [34]

A visibilidade da marca é subjetiva e dependente de vários fatores, tais como a textura da superfície, a cor, a profundidade e a área do chupado. De acordo com a literatura, depressões com profundidade inferiores a $5\mu\text{m}$ são de difícil ou impossível perceção pelo observador treinado, todavia para diferentes texturas, neste caso mais rugosas ou tintas opacas, esta métrica teórica pode aumentar para valores na ordem dos $40\mu\text{m}$ [34][35].

De modo a evitar marcas de chupados na peça, inicialmente, durante a fase de projeto de peça, deve-se evitar massas térmicas não uniformes, ou seja, pontos com elevada concentração de material. No entanto, a missão por vezes torna-se impossível por motivo da necessidade de reforçar a estrutura da peça. Assim, com esta implicação de projeto, de forma a atenuar o efeito, incide-se sobre as condições

de processamento, tais como a temperatura de fundido e do molde, tempo e pressão de compactação [33][35].

De acordo com o estudo realizado por Mathivanan et al. [36], com *Cyolac ARABS* e tendo como análise os gráficos da Figura 29, é possível verificar que o aumento da temperatura de fundido em combinação com outros fatores, influencia de forma positiva a profundidade do chupado. De acordo com a Figura 29 (a), o aumento da temperatura de fundido em combinação com a diminuição da temperatura do molde, promove o decréscimo da profundidade do chupado. Com o aumento da temperatura de fundido, apesar do aumento do volume específico, a viscosidade do material diminui, promovendo maior capacidade de escoamento e de compactação. Além disso, com uma temperatura do molde baixa, manifesta-se uma rápida transferência de calor durante a fase de arrefecimento, evitando uma contração excessiva [35][36].

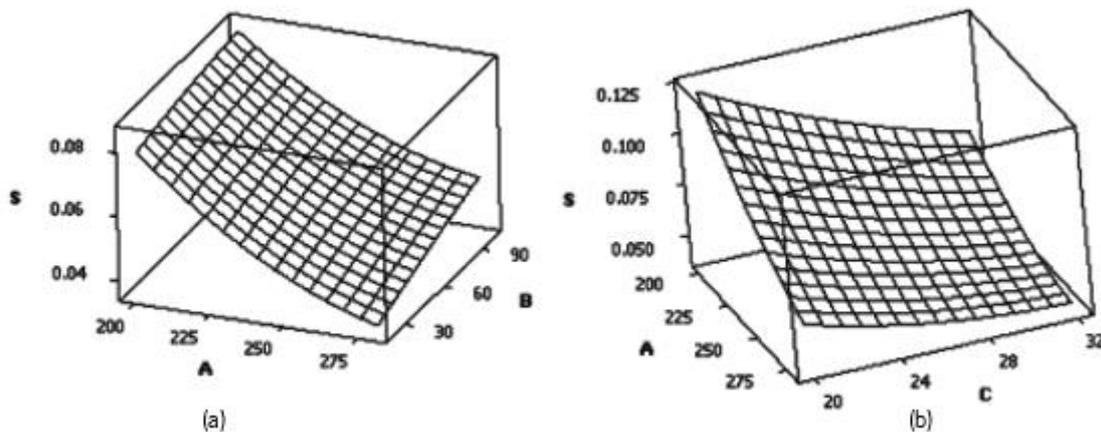


Figura 29. Profundidade do chupado: (a) temperatura de fundido (A) vs. temperatura do molde (B); (b) temperatura de fundido (A) vs. pressão de compactação (C) [36]

Conforme a Figura 29 (b), é possível considerar que a temperatura de fundido e a pressão de compactação contribuem, significativamente, na profundidade do chupado. O contínuo aumento de ambos os fatores conduzem à diminuição continuada da profundidade da marca [36]. Com o acréscimo da pressão, o volume específico de fundido diminui, indicativo de maior compactação de material. Desta forma, a variação de massa específica na peça uniformiza-se, bem como aumenta na perspetiva geral e, conseqüentemente, a contração volumétrica é igualmente uniforme [33].

Todavia, de acordo com outros estudos, o mesmo parâmetro, de forma individual, promove o aumento da profundidade da depressão. Este comportamento, deve-se ao progressivo aumento do volume específico do material com o aumento da temperatura que, conseqüentemente, reduz a indução de massa do mesmo na cavidade e, assim, maior taxa de contração [33].

Por outro lado, segundo a Figura 30, o aumento da temperatura do molde em função da redução pressão de compactação promove o aumento da profundidade da marca [36]. Com a aplicação de temperaturas mais elevadas, a velocidade de arrefecimento diminui, permitindo uma maior capacidade de relaxação molecular. Para além disso, a superfície da peça (casca) apresenta menor dimensão e, assim, menor resistência à força de tração promovida pelo núcleo. Deste modo, o aumento sucessivo da pressão de compactação, diminui progressivamente a profundidade do chupado, porém, este fator de processo, encontra-se limitado ao tempo de congelamento do ataque [35].

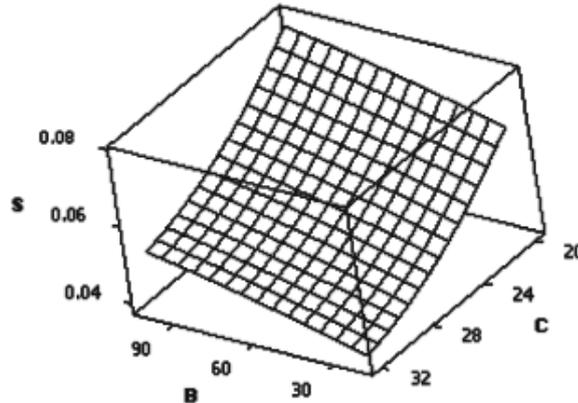


Figura 30. Profundidade do chupado: temperatura do molde (B) vs. pressão de compactação (C) [36]

Na Figura 31 relaciona-se o efeito da velocidade de injeção e da pressão de compactação, podendo-se verificar que a perceptibilidade do chupado é, praticamente, independente da velocidade de injeção [35]. Com o aumento gradual da velocidade, o chupado conservou-se, sendo apenas eliminado com o acréscimo da pressão de compactação, visto este ser o principal fator que promove a melhorias significativas [33].

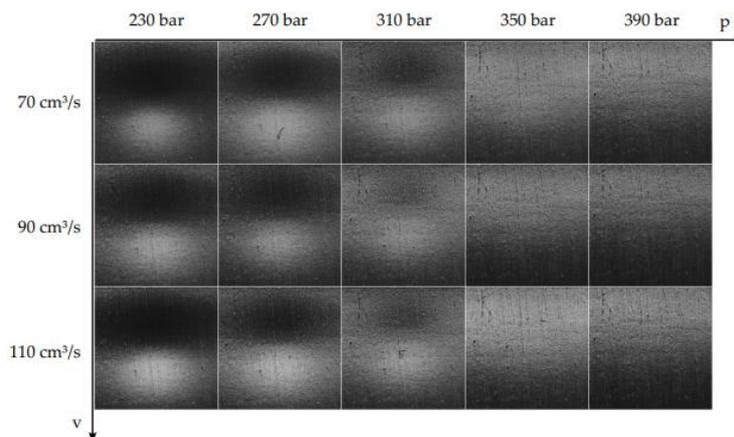


Figura 31. Efeito da velocidade de injeção e pressão de compactação no chupado [35]

No entanto, o comportamento dos chupados, tendo em conta as condições de processamento, não se manifestam de igual forma, visto que fatores de design, tipo de material e de ferramenta produtiva apresentam influência no comportamento. Na ferramenta produtiva, aspetos desde o tipo e localização do sistema de alimentação, o tipo de aço, a geometria do sistema de refrigeração, entre outros, são fatores diferenciais de peça para peça que apresentam efeito negativo ou positivo na perçetibilidade do defeito em causa [35]. Tendo como exemplo, ataques com maior proximidade das zonas em que existe uma maior probabilidade de chupados, promovem uma maior capacidade de compactação reduzindo a possibilidade de ocorrência do defeito [33].

Assim sendo, devido à variância existente, a própria literatura apresenta conclusões, por vezes diferentes. No estudo realizado por Mathivanan et al. [4], com aplicação de um *Cyclocac AR ABS*, o autor concluiu que o aumento da temperatura de fundido tende a diminuir a profundidade do chupado, sendo que a temperatura do molde aumentou o chupado e o tempo de compactação não apresentou grande influência. Por outro lado, Singh Solanki et al. [33], com uso de um *PP M108*, determinou que o aumento da temperatura de fundido tende a aumentar a perçetibilidade do chupado, o contrário do anteriormente indicado. Além disso, verificou ainda que a pressão de compactação é o fator com maior efeito sobre os chupados.

Portanto, os chupados apresentam soluções divergentes, bem como diferentes respostas às condições definidas, sendo necessário avaliar todos os fatores para determinar as variáveis operatórias ideais, de forma a minimizar a formação do defeito na peça moldada.

2.3 Evolução dos *Software's* CAE

Durante os anos 70, a indústria de plásticos em rápida ascensão e a exigência de elevados padrões de qualidade, contribuiu para o aumento da necessidade de desenvolvimento de modelos matemáticos com capacidade de simulação do processo de injeção. No entanto, o processo de moldação por injeção foi sempre visto como um processo de enorme potencial, contudo, a dificuldade passava pela complexidade de previsão do resultado da moldação, tendo em conta as condições de processamento, a morfologia e as propriedades finais [37][38].

O conceito CAE (*Computer-Aided-Engineering*) iniciou-se nos finais dos anos 50, através do trabalho realizado por Toor et al. [39] onde o autor desenvolveu uma metodologia para prever a velocidade média de injeção de fundido numa cavidade retangular. Estes resultados serviram de auxílio para deduzir o tempo necessário de enchimento de uma cavidade com determinado comprimento. A técnica de cálculo desenvolvida contabilizava a perda de calor por condução e utilizou parâmetros

determinados experimentalmente para o efeito de temperatura e velocidade de corte na viscosidade do fluido, todavia o efeito de dissipação viscosa não foi definido no modelo [38].

Como referido, os anos 70 foram os principais para o desenvolvimento de modelos matemáticos com capacidade de descrever o processo com a devida eficácia [37][38]. Em 1971, Barrie [40] estudou a queda de pressão no sistema de alimentação de um disco, verificando a necessidade da incorporação da viscosidade elongacional no modelo, para previsão da pressão na cavidade na região próxima ao jito, devido à taxa de deformação elongacional desenvolvida na respetiva zona [38]. Kamal e Kenig [41] apresentou um modelo teórico para o processo de injeção completo, dividindo-o em três etapas: a fase de enchimento, compactação e arrefecimento. A divisão ocorre apenas para simplificação da fase de cálculo, sendo que, posteriormente o modelo integra todas as etapas num processo global. Para os efeitos de campos de temperatura e pressão, é aplicado o método de diferenças finitas (FDM) [38][41]. Williams e Lord [42] analisaram um sistema de alimentação, tendo em conta a aplicação do método das diferenças finitas, com capacidade de previsão da temperatura, pressão e distribuição de velocidades. O modelo, posteriormente, foi adaptado para a análise da fase de enchimento da cavidade, admitindo capacidade de modelação do processo de injeção [38][42].

O principal marco dos anos 70 deve-se à criação da primeira empresa com um foco principal na simulação do processo de injeção. Fundada na Austrália por Colin Austin em 1978, o MoldFlow® [43], tratava-se do primeiro *software* CAE comercial de simulação, com capacidade de determinar condições de processamento básicas, tais como, a temperatura de fundido, do molde e tempo de injeção. A primeira edição do *software* assentava nos trabalhos realizados por Barrie [40], Kamal e Kenig [41] e Williams e Lord [42]. Para além disso, Austin [44] desenvolveu e aplicou a aproximação *layflat*. Com a introdução desta metodologia, o cálculo ocorria num modelo plano da peça, ou seja, reduzia-se um problema tridimensional para um modelo de apenas uma dimensão, decompondo-a em geometrias mais simples. A qualidade de resultados é fortemente dependente da qualidade da projeção para uma dimensão, sendo esta dependente das competências do utilizador e da complexidade da peça. No entanto, para geometrias simples, a técnica apresenta bons resultados, contudo, para peças com maior nível de complexidade, a técnica não proporcionava capacidades de precisão [37][38].

Os cálculos térmicos assentaram na metodologia definida por Barrie [40], considerando uma temperatura de molde constante entre a interface fundido/molde. A temperatura de fundido foi também definida como constante, no entanto, a transferência de calor por convecção e condução foram empregues, bem como o efeito de dissipação viscosa. Em relação à viscosidade do material, esta foi modelada através do modelo da lei de potência, apresentado no trabalho de Williams e Lord [42],

incluindo o efeito de temperatura e comportamento pseudoplástico. Por fim, a queda de pressão foi calculada tendo em conta as funções analíticas para o fluxo em geometrias simples. A análise de resultados permitia determinar as pressões e tempos de enchimento ao longo de cada trajeto, com o objetivo de alterar as espessuras da peça, com a finalidade de obter um equilíbrio de escoamento e eliminar possíveis prisões de ar [38].

Nos anos 80, a indústria CAE evoluiu rapidamente, com base na evolução tecnológica permitindo, assim, fornecer capacidades de previsão para além da fase de enchimento, acrescentando-se a fase de compactação e arrefecimento. Esta década foi ainda marcada pela introdução do método de elementos finitos (FEM) [37][38]. Durante este período, a Universidade de McGill desenvolveu o *software* Mckam para cálculo da fase de injeção e compactação [45]. Mckam aplica o método das diferenças finitas para a discretização numérica das equações governativas, sendo este utilizado com o objetivo de prever propriedades como a birrefringência e o módulo elástico [45].

Outros artigos foram publicados, todavia um dos maiores avanços da década foi dado pelo grupo *Cornell Injection Molding Program* (CIMP), liderado por K.K. Wang da Universidade de Cornell, com a introdução da análise 2D/2.5D do processo [38]. Com base nos trabalhos de Hieber and Shen em 1980 [46], tendo o anterior autor base nas equações de Hele-Shaw [47], o CIMP introduziu um código com capacidade de analisar a geometria como um conjunto de paredes com espessura infinitesimalmente pequena tendo em comparação a largura e comprimento. Deste modo, a espessura da peça é reduzida para zero, sendo que a geometria é reduzida para um conjunto de *shell elements*, e, conseqüentemente, as equações governativas simplificadas para um caso 2D. Esta abordagem apresenta um maior nível de proximidade à geometria real do que quando comparado com o método *layflat*. O modelo possui uma abordagem híbrida, onde concilia métodos de elementos finitos e de diferenças finitas. O campo de pressão não é calculado ao longo da espessura, sendo definido numa malha 2D no plano médio da peça através de elementos finitos (FEM). A temperatura é definida num campo tridimensional através do método de diferença de elementos finitos (FDM), permitindo uma abordagem de controlo de volume para a frente de fluxo. Com isto, devido às diferentes descrições dimensionais das variáveis, o modelo é também conhecido como análise de “plano médio 2.5D” [38].

O CIMP produziu vários códigos, sendo que o código TM-2, concluído em 1980, era limitado apenas à análise de um único ponto de ataque. Em 1986, foi lançado o TM-7 com capacidade de analisar o sistema de alimentação e uma espessura variável da peça, com aplicação de elementos triangulares. A viscosidade foi ainda modelada tendo em conta dependência da temperatura, velocidade de corte e pressão. Em 1989 divulgou-se a última versão, o TM-10-C, que oferecia uma análise de plano médio

2.5D na fase de enchimento e de compactação, com capacidade de ser aplicado a geometrias com paredes finas com variação de espessura e aplicava o modelo de fluido compressível [38].

Em 1987, um grupo liderado por J. Vlachopoulos na Universidade de McMaster, no Canadá, formou o Centro de Processamento e Design Avançado de Polímeros (CAPPAD). Este, geralmente, lidava com outros processos de transformação, contudo, efetuou estudos fundamentais sobre o característico escoamento em fonte dos materiais poliméricos. Todos os estudos anteriores a este, assumiam um escoamento bidimensional, isto é, não ocorria variação da pressão ao longo da espessura e, como efeito da respetiva simplificação, não ocorria gradiente de velocidades na respetiva direção [48][49]. O cálculo deste efeito tornou-se possível de descrever através da implementação do método de elementos finitos [49].

A fase de arrefecimento é a etapa mais demorada do ciclo de injeção, sendo que durante a época foram desenvolvidos poucos estudos relacionados. Devido à falta de otimização do sistema de arrefecimento, a indústria e investigadores sentiram a necessidade de estudar o fenómeno, a fim de aumentar a produtividade e redução dos tempos de ciclo. Para além disso, por ação do impacto do arrefecimento no desenvolvimento do efeito de contração e empenos, foi fundamental considerar a fase nos *software's*, isto para maior capacidade de previsão do comportamento [38].

Kwon et al. [50] introduziu uma solução para análise de arrefecimento do molde através de uma abordagem 1D. Himasekhar et al. [51] ampliou o conceito do autor anterior, considerando o problema como condução 1D aplicando o método das diferenças finitas (FDM) para a temperatura do molde e de fundido. Mais tarde, Himasekhar introduziu uma abordagem 3D, para o qual a temperatura do molde era calculada através do método de elementos de fronteira (BEM) e aplicação de FDM para a transferência de calor no polímero. Esta abordagem tornou-se a mais comum para o efeito de simulação do arrefecimento, isto porque aplicava uma solução de diferença finita ou semi-analítica para o polímero e uma abordagem de transferência de calor 3D no molde com BEM. Além disso, o método BEM para estudo do arrefecimento no molde, tornou-se a solução padrão devido às capacidades limitativas de *hardware* na época. Tal deve-se ao facto da improbabilidade dos equipamentos existentes apresentarem capacidade de gerar uma malha 3D do molde e, deste modo, com a introdução de BEM apenas é necessário gerar uma malha de superfície externa [38].

Durante este tempo, poucos trabalhos sobre a previsão de contração e empenos nas peças moldadas foram publicados. Os estudos iniciais concentravam-se, principalmente, na previsão de tensões residuais nas peças injetadas, sendo este desenvolvimento influenciado pela literatura sobre tensões residuais no vidro. Isayev et al. [52] estudou a influência das tensões induzidas pelo fluxo de

enchimento em polímeros amorfos, concluindo que apresentam máximos junto à superfície moldante, isto causa do comportamento termomecânico desenvolvido. Titomanlio et al. [53] promoveu a ligação entre o efeito da pressão de compactação no desenvolvimento de tensões residuais [38].

O ampliar do campo de conhecimento na área de simulação, contribuiu para o aumento de programas comerciais para simulação do processo de injeção. No início dos anos 80, o único *software* era o Moldflow and Plastics & Computer. No final da década tinham-se códigos de simulação da *General Electric; Philips/Technical University of Eindhoven; Graftek Inc.; Structural Dynamics Research Corporation (SDRC); AC Technology; Moldflow Pty. Ltd.; Simcon GmbH* [38].

No início dos anos 90, a análise em geometrias tridimensionais não era ainda viável, isto devido aos recursos computacionais limitados. No entanto, a década pode ser descrita como o período em que a geometria 3D começou a dominar a indústria de simulação do processo de injeção [38].

Chiang et al. [54] introduziu um modelo teórico unificado para simular as fases de enchimento e compactação. A implementação do modelo é baseado numa solução numérica híbrida entre FEM/FDM para um fluido viscoso compressível sob condições não isotérmicas. A viscosidade foi definida tendo em conta o modelo de Cross-WLF, considerando a dependência da velocidade de corte, a temperatura e pressão. Para a fase de compactação, concluiu-se que a compressibilidade do fundido apresenta um papel crítico e, portanto, a massa específica não pode ser considerada constante [38][54].

Outras contribuições significativas provieram da Universidade Técnica de Eindhoven, por parte de trabalhos de Douven [55], simulando o desenvolvimento de tensões residuais por meio de um modelo viscoelástico para um polímero amorfo [38][55]. Em Itália, o grupo de Titomanlio, estudou a queda de pressão durante a fase de compactação aplicando um modelo da cinética de cristalização, concluindo que o fluxo afeta a cristalização do material, ou seja, ocorrência de cristalização induzida pelo fluxo. Para além disso, foi possível determinar que o cálculo das quedas de pressão são obtidos com maior precisão, quando aplicado o modelo da cinética da cristalização [56].

O marco mais importante da década, foi dado por Héту el al. [57], descrevendo o primeiro código de análise 3D para a fase de enchimento. O código aplicava o método FEM através de uma discretização do domínio com geometrias tetraédricas, com capacidade de determinar a pressão, a velocidade, a temperatura, bem como a posição da frente de fluxo. O autor aplicou as equações de Navier-Stokes para determinar a pressão, e ainda três componentes de velocidade em cada nó do elemento. Para controlo da frente de fluxo, o autor aplicou o método de pseudoplástico, que envolvia o uso da derivada material ou derivada substancial, Equação 3 [38].

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\delta F}{\delta t} + \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{F} \quad (3)$$

A equação é aplicada em mecânica de fluidos com a finalidade de representar a taxa de variação F em um determinado ponto do fluido, com determinada velocidade associada. O parâmetro F varia entre 0 e 1, sendo que quando $F=0$ a cavidade está vazia e quando $F=1$ determinada região da cavidade está preenchida com material [38].

A MoldFlow® introduziu em 1998 uma abordagem de análise totalmente 3D para a fase de enchimento, com base no trabalho de Rajupalem et al. [58], sendo estendida para a fase de compactação em 1999 pelo trabalho de Talwar et al. [59].

Com o ampliar do campo de conhecimento, nos anos 90 introduziram-se capacidades para simulações de moldação alternativas, incluindo *gas-assisted injection molding*, *co-injection molding*, *injection compression molding* e *reactive molding process* [37][60]. Para além disso, desenvolveram-se novos *softwares* comerciais, sendo estes: *SDRC; Moldflow; AC Technology/C-MOLD; Simcon; Sigma Engineering; Timon; Transvalor e CoreTech Systems* [38].

Com o desenvolvimento de análises tridimensionais, as principais áreas que requeriam algum trabalho eram as relacionadas com os efeitos de contração, as deformações, as tensões residuais, a recuperação elástica, entre outros. O novo século proporcionou novos trabalhos direcionadas para as respetivas áreas, bem como no desenvolvimento da morfologia da peça, com a finalidade de definir a melhor relação entre as condições de processamento, o desenvolvimento da morfologia e as propriedades finais [38].

A maioria do campo científico até ao novo século aplicava o método das diferenças finitas ou dos elementos finitos, no entanto, nos primeiros anos, o método de volume finito foi aplicado para simulação 3D do processo de injeção, proposto por Chang e Wang [61] em 2001. A elevada aplicação dos métodos de discretização FEM e FDM devem-se às suas vantagens relevantes. O FDM, em comparação com o FEM, é um método numérico mais simples e mais eficiente, no entanto é menos eficaz para geometrias com maior nível de complexidade. O FDM discretiza o domínio numa série de pontos, enquanto FEM discretiza o domínio num conjunto de elementos geométricos com diferentes geometrias. Deste modo, para o mesmo número de pontos e elementos, FEM tende a apresentar uma maior ordem de precisão. A desvantagem da aplicação de FEM encontra-se associada à elevada necessidade de capacidade de cálculo por parte do computador e armazenamento de dados por parte do sistema computacional [61][62].

A principal vantagem da aplicação do método FVM deve-se a maior capacidade de eficiência do tempo de cálculo e gestão de dados. Para além disso, apresenta maior estabilidade computacional do que o FEM. O método discretiza o domínio em um número finito de volumes, podendo estes apresentar

forma e tamanho irregular, conferindo assim capacidade de lidar com geometrias complexas [61]. O método foi aplicado em 2001, onde Chang e Wang previram que tanto a análise de Hele-Shaw e a 3D FVM apresentam resultados próximos para geometrias com espessura reduzida, sendo a primeira abordagem mais eficiente. No entanto, para geometrias com espessura maior ou com mudanças abruptas de espessura, o método FVM apresenta maior precisão do que o modelo de Hele-Shaw [61].

O campo científico de simulação focou-se mais na ligação entre o efeito das condições de processamento no desenvolvimento da morfologia e, como resultado, nas propriedades finais da peça. Com este objetivo definido, destacam-se os trabalhos de Janeschitz-Kriegl e Eder [63][64], onde apresentaram o efeito da velocidade de corte na cinética de cristalização e na morfologia resultante. Depreenderam que baixas velocidades de corte favorecem o crescimento das estruturas esferulíticas, enquanto que, para elevadas velocidades de corte é induzida orientação molecular. Zuidema [65] conduziu a primeira simulação com a finalidade de prever a morfologia desenvolvida, aplicando as equações de Schneider [66] para determinar a distribuição e orientação das estruturas esferulíticas desenvolvidas. Os *softwares* continuaram em progressiva evolução como por exemplo o *Timon*, a *CoreTech Systems* e o *Moldflow* [38].

O desafio da época presente é referente ao conceito de *digital twins*. O objetivo passa por desenvolver um sistema ou construir um modelo computacional com capacidade de conceber uma imagem gêmea do processo físico, sendo neste caso em particular, replicar o processo de injeção com aplicação de um *software* CAE. Os modelos construídos são, por definição, simplificações do caso real e, portanto, tendem a não replicar o processo com o mesmo detalhe que o ocorrido na realidade. Deste modo, a dificuldade passa por definir quais as divergências existentes entre o sistema real e o modelo computacional, de modo a promover uma imagem gêmea entre os dois.

2.3.1 Moldex3D®

O Moldex3D® é um *software* CAE (*Computer Aided Engineering*) desenvolvido pela CoreTech System em 1995 [67]. O Moldex3D® permite simular o processo de moldação por injeção, combinando modelos matemáticos por processos de elementos finitos (FEM), as propriedades reológicas dos materiais poliméricos e as condições de processamento de modo a calcular o comportamento destes materiais dentro de cavidades dos moldes [68][69].

Cada versão do Moldex3D® impulsionou novas melhorias e avanços significativos para o *software* tornando-o mais eficiente e preciso. A primeira versão foi lançada em 1995, permitindo apenas uma análise 2D da fase de enchimento, bem como providenciava informações sobre o comportamento

do fundido durante o escoamento. A segunda versão, R2.0, introduziu capacidades de simulação 3D e moldação com multi-cavidades. Em 2004, a versão R4.0 permitiu simular todo o processo de moldação por injeção, incluindo a fase de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno. De uma forma geral, todas as versões promoveram uma melhoria contínua a nível de cálculo, eficácia e velocidade, tornando-o uma das soluções de *software* mais utilizada para efeitos de simulação de processos de injeção.

Com a utilização do referido *software* tem-se como principal objetivo modelar, analisar e otimizar todo o processo de injeção, com o princípio de auxílio desde a fase de projeto até à fase de produção como ilustrado na Figura 32. Esta metodologia permite reduzir os custos relacionados com o processo, o fabrico da peça e molde, bem como a redução de tempos de ciclo e minimização de defeitos [69][70].

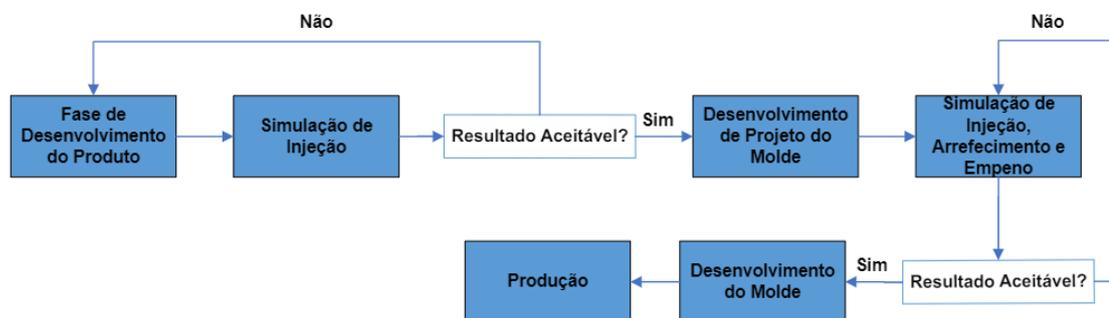


Figura 32. Fluxograma de desenvolvimento de produto e molde com auxílio de software de simulação [16]

De acordo com a Figura 32, as primeiras iterações de simulação ocorrem durante a fase de desenvolvimento do produto, com o objetivo de analisar a eficácia do sistema de alimentação, capacidade de escoamento e localização de linhas de soldadura.

De seguida, caso a simulação se encontre conforme o objetivo e as características do projeto, avança-se para o desenvolvimento do projeto do molde. Com o início da produção do molde, de forma a avaliar a eficiência do sistema de arrefecimento, realizam-se novas simulações, analisando-se, essencialmente, o desenvolvimento de empenos finais na peça. Caso conforme, procede-se à construção do molde e, por fim, inicia-se a produção, onde também através de simulações, tenta-se prever as condições de processamento ideias, diminuindo assim a abordagem tentativa-erro e o desperdício de material na fase de arranque do projeto.

O programa apresenta um conjunto completo de ferramentas de simulação de distintos processos de transformação de materiais poliméricos, simulando o processo de moldação por injeção, como também detém competência de simulação de processos não convencionais tais como: *Bi-injection*, *Co-injection*, *Foam injection*, *Powder injection*, *Gas-Assisted injection*, *Water-Assisted injection*, *Injection*

Compression, Chemical Foam Molding, Compression molding, Resin Transfer Molding e Encapsulation [67].

Para além da capacidade de definir as condições de processamento, permite também analisar o impacto dessas mesmas condições em termos dos defeitos. Desta forma, o Moldex3D® possibilita avaliar e visualizar linhas de soldadura, chupados, empenos e contração, com a finalidade de atuar sobre os mesmos para assim diminuir a probabilidade da sua ocorrência.

2.3.1.1 Moldex3D® - Linhas de soldadura

As linhas de soldadura são apresentadas no Moldex3D® como demonstrado na Figura 33, sendo possível, avaliar a localização, o ângulo entre as frentes de fluxo e a distribuição da temperatura ao longo da linha. Deste modo, a métrica para este defeito terá em conta o ângulo e a respetiva temperatura, com o objetivo de definir um valor entre dois parâmetros que garantam a qualidade da linha de soldadura, considerando os requisitos pretendidos.

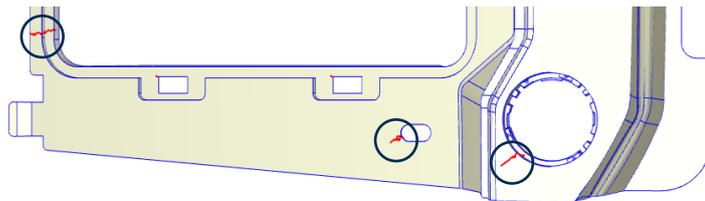


Figura 33. Apresentação de linhas de soldadura no Moldex3D®

2.3.1.2 Moldex3D® - Chupados

Os chupados são ilustrados no Moldex3D® através de um gradiente de cores na peça, como ilustrado na Figura 34. A cor estabelecida indica a probabilidade de ocorrência de chupados na peça tendo em conta a fase de compactação. Um valor positivo mais alto é indicativo de uma maior necessidade de compactação e um valor mais baixo indica uma sobre compactação. Para além do indicador probabilístico, é também possível avaliar metricamente o chupado ao longo da superfície da peça, sendo fornecido um valor relativo ao deslocamento superficial ocorrido [71].

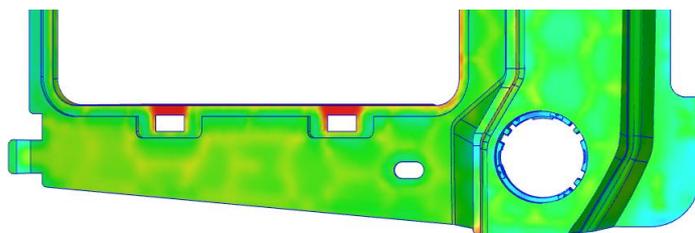


Figura 34. Representação da probabilidade de ocorrência de chupados no Moldex3D®

Tendo em conta os dados relativos ao defeito, pretende-se, desta forma, determinar o valor mínimo probabilístico e o deslocamento superficial do chupado, que previna a moldação sem desenvolvimento de chupados.

2.4 Método dos Elementos Finitos (FEM)

A ideia subjacente ao conceito de Método dos Elementos Finitos (FEM) é a modelação de um problema genérico que envolve meios contínuos através da análise de partes discretas desse domínio para o qual é possível aplicar uma descrição matemática sobre o comportamento. Ao processo de divisão do domínio num conjunto de elementos finitos define-se o conceito de discretização. Cada elemento discreto, elemento finito, e as respetivas leis matemáticas que regem o seu comportamento, contribuem para o conhecimento e análise do problema global. Portanto, o conceito, de uma forma simplificada, consiste numa abordagem de cálculo que passa por resolver um dado problema complexo, ou sem solução analítica, através da resolução sequencial e estruturada de vários problemas simples e com solução matemática, que quando agrupados, conduzem a uma solução do problema inicial [72].

A primeira referência designada como método dos elementos finitos surgiu em 1960 no trabalho de Ray Clough [73]. Contudo, contribuições anteriores pelo trabalho de Courant [74], na década de 40, apresentaram exemplos de metodologias de discretização de meios contínuos em elementos triangulares. Os primeiros elementos finitos, em 1956, ainda que não denominados como tal, foram sistematizados e descritos no trabalho de Turner et al. [75], onde desenvolveram três tipos distintos de elemento finito: um elemento triangular, um quadrilátero genérico e um retangular [72][76].

Os grandes passos do desenvolvimento do MEF, que o conduziram ao formato que atualmente apresenta maior aceitação, foram dados na década de 60 e início de 70. Ao contrário de outros métodos que eram utilizados, o MEF só tem utilidade prática se se dispuser de um computador. Este requisito deve-se à grande quantidade de cálculos que é necessário realizar, nomeadamente na resolução de grandes sistemas de equações lineares. Assim se compreende que o rápido desenvolvimento do MEF tenha praticamente coincido com o desenvolvimento dos computadores [76][77].

Em 1965, o trabalho dos autores Zienkiewicz and Cheung [78] permitiram ampliar o conceito do método dos elementos finitos, visto apresentarem o FEM como uma abordagem possível para resolução de equações diferenciais parciais (PDEs). Deste modo, os autores apresentaram exemplos de aplicação de FEM em problemas estruturais, bem como em problemas de transferência de calor e mecânica de fluidos [72][76][79].

O método dos elementos finitos trata-se de uma técnica de métodos numéricos que consiste na discretização do domínio geométrico em vários subdomínios com a finalidade de alcançar um problema discreto, como ilustrado na Figura 35 [80][81]. Para atingir tal objetivo, o método considera o sistema global como o equivalente a um agrupamento de elementos finitos, no qual cada um destes elementos é uma estrutura contínuo e simples. Desta forma, é imperativo que o domínio seja todo abordado pelos elementos, sem nunca ocorrer sobreposição de elementos ou espaço vazio entre eles, dando origem ao conceito de malha [82].

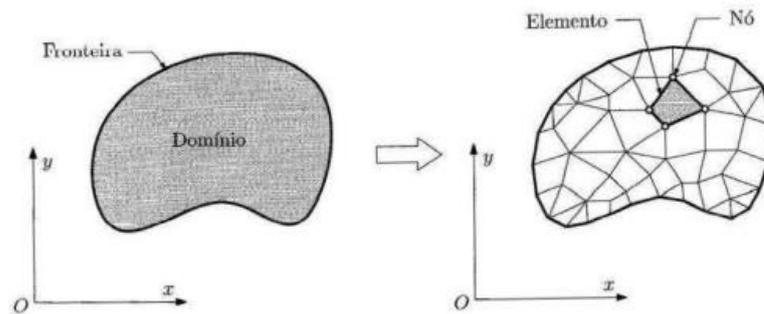


Figura 35. Processo de discretização de um domínio por elementos finitos [72]

A configuração, dimensão e número dos elementos são definidos, essencialmente, tendo em conta o domínio e o número de coordenadas independentes para descrever o problema. Caso a geometria, propriedades da matéria-prima e variáveis do problema possam ser descritas numa única coordenada espacial, aplicam-se elementos finitos unidimensionais em forma de segmentos, representados na Figura 36 a). No caso de problemas descritos em duas coordenadas espaciais independentes, aplicam-se elementos finitos 2D, como ilustrado na Figura 36 b), sendo o elemento triangular o mais aplicável e simples. Contudo, elementos quadriláteros (retângulos ou paralelogramos) podem ser definidos pela junção de dois ou quatro elementos triangulares [72][76].

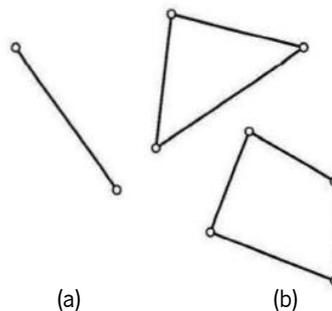


Figura 36. Formas geométricas de elementos finitos: (a) unidimensionais; (b) bidimensionais [72]

Em problemas definidos por três coordenadas espaciais independentes, aplicam-se elementos finitos 3D, representados na Figura 37, sendo o elemento tridimensional básico, análogo ao elemento triangular no caso de problemas 2D, o tetraedro. Elementos pentaedros, prismas retangulares, pirâmides e hexaedros definem igualmente um problema 3D, sendo os hexaedros definidos por um conjunto de cinco tetraedros [72][76].

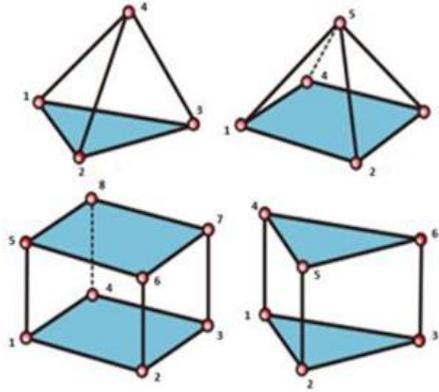


Figura 37. Formas geométricas de elementos finitos tridimensionais [68]

Os elementos finitos encontram-se definidos por nós, como representado na Figura 35, podendo estes serem classificados como internos ou externos e primários ou secundários. Para além disso, definem a geometria do elemento e a forma como estes se conectam entre elementos adjacentes. Os nós externos localizam-se nas fronteiras dos elementos e são comuns a dois ou mais elementos, no entanto, os internos situam-se no interior de elementos 2D ou 3D sem conexão a outro elemento. A inclusão de nós interiores, também designados como nós de integração ou pontos de Gauss, conferem uma maior precisão à solução exata em problemas com elevada variação espacial física, no entanto, compromete o tempo de cálculo. Em relação aos nós primários ou secundários, os primários encontram-se no início e fim dos elementos 1D ou nos vértices dos elementos 2D e 3D, e os secundários situam-se ao longo da fronteira do elemento entre os primários [62].

Cada nó representa um ponto no espaço onde as equações diferenciais, que descrevem o problema, são aproximadas por equações algébricas, sendo a sua solução, dada através da combinação dos resultados de cada um dos nós. Deste modo, os nós têm como objetivo conectar e promover as condições ao elemento adjacente, uma vez que, o valor em cada conexão é o mesmo para cada elemento conectado ao nó, promovendo assim a continuidade do problema [81].

A precisão de resultados é dependente do número de elementos usado para caracterizar o problema, ou seja, aumentando a sua quantidade, aumenta o grau de caracterização, havendo assim maior aproximação da solução exata. No entanto, embora maior número de elementos signifique maior

precisão, existe um número de elementos além dos quais a precisão não é significativamente melhorada, sendo este comportamento representado graficamente na Figura 38. Isto, deve-se ao facto de ocorrerem simplificações nos modelos matemáticos, que por consequência, implicam ligeiros desvios da solução exata. Para além disso, quanto mais refinado for o domínio em estudo, maior será o tempo de cálculo, o que corresponde a uma maior necessidade de capacidade de *hardware* do computador. Nesse sentido, pretende-se obter um equilíbrio entre a definição de exatidão dos resultados e o tempo de cálculo necessário para obter esses mesmos resultados [76][83].

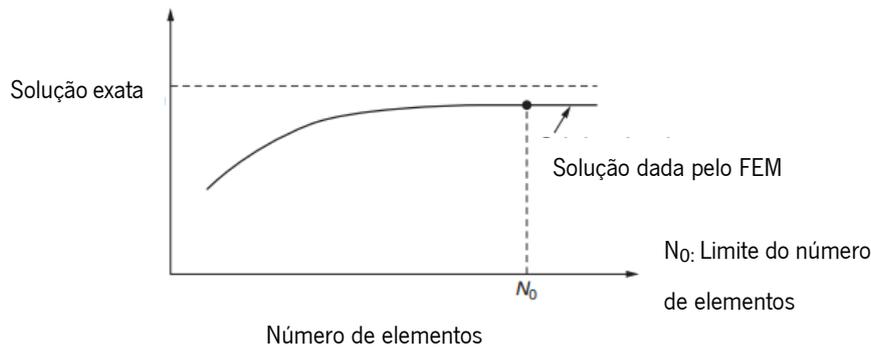


Figura 38. Efeito do número de elementos [76]

Novos paradigmas de construção de malhas têm vindo a ser adotados de modo a não perder qualidade no resultado e tendo em conta o tempo de cálculo, como por exemplo a utilização de malhas não uniformes. Assim, com este conceito, em áreas onde ocorre pouca variação da geometria, devem ser aplicados elementos de maior dimensão e em áreas de grande detalhe devem ser aplicados elementos de menor dimensão [83][84].

O Moldex3D® apresenta suporte para criação de várias tipologias de malhas, tais como malha de camada limite (*Boundary Layer Mesh (BLM)*), malha automática (*eDesign*) representadas na Figura 39 e malha híbrida (combinação de diferentes geometrias de elementos contribuindo para aumento da eficiência de cálculo) [67].

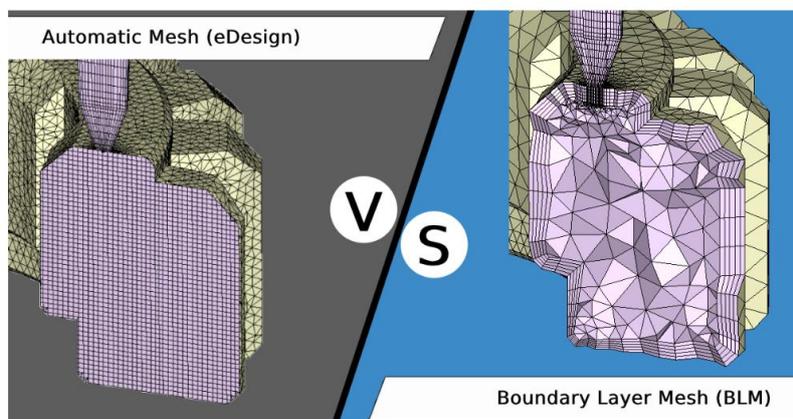


Figura 39. Tipologias de malhas no Moldex3D® [85]

A malha *eDesign* é uma técnica com base em algoritmos, onde se gera uma malha autónoma e adaptada à geometria da peça, de modo a ajustar a densidade de elementos nas zonas críticas. O usuário indica o nível de precisão, sendo este classificado numa escala compreendida entre um e cinco, onde o nível cinco origina uma malha com precisão superior. Desta forma, a principal vantagem de aplicação desta malha deve-se à sua autonomia de construção, sendo aplicado em geometrias com características complexas [67].

A malha BLM é uma técnica aplicada pelo Moldex3D®, relevante aquando da interação fluido-estrutura ou na análise de componentes de reduzida espessura, permitindo assim modelar com precisão os fenómenos ocorridos junto à superfície moldante. Nesta técnica, são geradas automaticamente entre uma a cinco camadas de elementos prismáticos ao longo da superfície da peça, sendo o restante domínio subdividido em elementos tetraédricos. Com esta configuração de malha, é possível obter maior precisão de resultados nas regiões superficiais permitindo, deste modo, prever efeitos de linhas de soldadura, de empeno, bem como análise de perfis de velocidade, temperatura e pressão junto às paredes do molde. Além disso, uma outra vantagem desta técnica deve-se à redução do tempo de computação, devido à concentração de elementos em zonas de maior criticidade [86].

3.1 Conceção do Modelo em Moldex3D®

3.1.1 Seleção da Peça

Como primeiro caso de estudo, a peça selecionada é intitulada como *Boden Ablage M LL*, ilustrada na Figura 40. Esta localiza-se no painel central estético da OEM Volkswagen, sendo injetada com a matéria-prima PC/ABS. Este componente, foi selecionado tendo em conta a probabilidade de originar todos os defeitos em causa, sendo que apresenta linhas de soldadura devido à geometria que promove a divisão do fluxo e proporcionada elevada possibilidade de chupados, isto causa da constituição com várias nervuras de modo a reforçar mecanicamente a peça.



Figura 40. Boden Ablage M LL: (a) vista frontal; (b) vista posterior

De modo a promover a injeção, o molde apresenta um sistema de alimentação híbrido, ou seja, é constituído por um canal quente que, posteriormente alimenta um canal frio, apresentado na Figura 41. A injeção do material na peça, ocorre através de um ataque submarino curvo (ataque “em banana”), tendo como finalidade ocultar a marca de ataque.



Figura 41. Boden Ablage M LL, Sistema de alimentação de canais frios

3.1.2 Importação do CAD

A importação do ficheiro em (.stp) para o Moldex3D®, dá início à construção do modelo. Durante esta fase, ocorre uma etapa importante que influencia a eficácia da construção da malha e possíveis erros nesta. Tal deve-se ao facto de a peça apresentar vários pormenores geométricos, tais como, *fillets*, *chamfers*, *ribs*, entre outros, que são difíceis de serem reproduzidos por malhas poligonais, tornando-se necessário simplificar a geometria. Com o auxílio do CADDdoctor, um *software* integrado no Moldex3D®, são efetuadas simplificações que não comprometam a veracidade do modelo virtual. Avaliando o modelo CAD foi apenas necessário eliminar os *fillets* com dimensão inferior a 1mm.

3.1.3 Construção do sistema de alimentação

Para a construção do sistema de alimentação híbrido são utilizadas ferramentas de construção internas do Moldex3D®. Porém, como estes modelos predefinidos possuem algumas limitações, devido ao facto de este ser um *software* de simulação e não de construção, são muitas vezes utilizados *software's* de modelação CAD, por exemplo, o *SolidWorks*.

Na Figura 42, estão representados os tipos de ataques predefinidos que, posteriormente, são localizados (por 1 ou 2 pontos) e parametrizadas as suas dimensões.

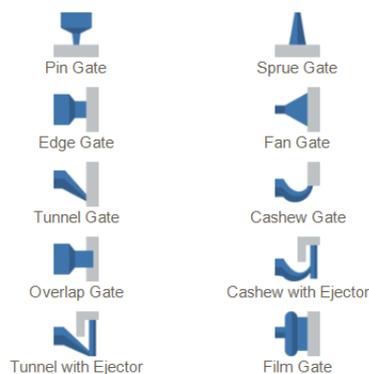


Figura 42. Biblioteca de Ataques no Moldex3D®

Como referido anteriormente, o sistema de alimentação é constituído por um ataque submarino curvo, pelo que é selecionado o *Cashew Gate*. Assim, após seleção, define-se a sua localização e dimensão tendo em conta o modelo real. Posteriormente, constrói-se os canais de alimentação, representados através de retas, como demonstrado na Figura 43, sendo à posteriori facultado um atributo.

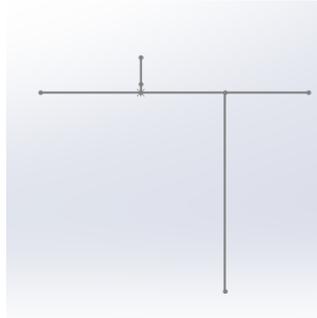


Figura 43. Construção dos canais de alimentação

Após o atributo a todas as linhas, finaliza-se a construção do sistema de alimentação frio, como apresentado e comparado com o modelo real na Figura 44. Contudo, é possível verificar ligeiras desigualdades entre os dois canais, isto porque o sistema de alimentação acumula elevadas tensões residuais devido ao desequilíbrio geométrico, sendo que, após arrefecimento são desenvolvidos empenos, como visível Figura 44 b).

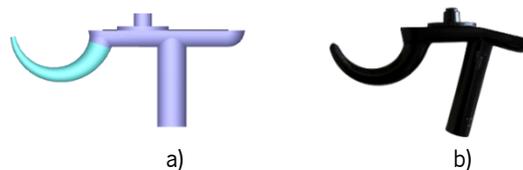


Figura 44. Canais frios: (a) Modelado no Moldex3D®; (b) Caso real

Por fim, dá-se a construção dos canais quentes com o processo similar ao anteriormente descrito, ou seja, construção de linhas e posteriormente aplicação de atributos. Na Figura 45 encontra-se ilustrado o sistema de alimentação híbrido, contudo, neste caso particular o molde apresenta duas cavidades iguais. Ao invés de se construir a outra cavidade por comandos de “espelhamento”, que torna o modelo muito mais pesado e moroso a calcular as suas soluções, o Moldex3D®, atualmente, contém a possibilidade de criar diferentes simetrias, até 4 cavidades, que sucintamente amplia os resultados obtidos para este modelo ao total número de cavidades simétricas.

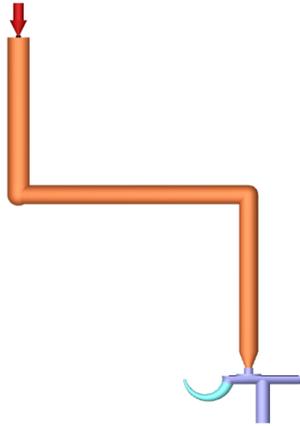


Figura 45. Representação do sistema de alimentação híbrido

3.1.4 Molde e Sistema de Refrigeração

Para a construção do sistema de refrigeração, foi utilizado o desenho CAD do respetivo molde. A partir deste, obteve-se o esquema dos canais de arrefecimento e posteriormente, foram importados para o *SolidWorks*, como apresentado no Anexo 1. Assim, no *SolidWorks*, com o uso do *3D Sketch*, sobrepuseram-se linhas concêntricas sobre os canais, obtendo-se o esquema destes, representados apenas por linhas. A necessidade de construção de linhas ocorre, visto que, ao importar diretamente os canais para o Moldex3D®, o ficheiro iria sobrecarregar o programa, aumentando, assim, o tempo de cálculo da simulação, bem como, maior probabilidade de originar erros durante a construção da malha.

Após a finalização da construção das linhas, tanto na cavidade como na bucha, dá-se a importação do ficheiro com formato (.igs) para o Moldex3D®. Posteriormente, inserem-se atributos de canais de arrefecimento, indica-se o tipo de canal (Baffle, Bubbler, Hose, Circular) e por fim as respetivas dimensões. De seguida, é necessário indicar as entradas e saídas de água, que pode ser feito manualmente ou automaticamente.

Para finalizar a construção do sistema de refrigeração, é essencial verificar se não existe nenhum erro no respetivo sistema. Assim, o *software* realiza uma análise automática, onde verifica as distâncias relativas entre os canais de arrefecimento e a peça, bem como ao sistema de alimentação. Para além disso, analisa possíveis erros de construção, sendo obrigatório a correção de todos as anomalias. Após todas as etapas cumpridas, a construção do sistema de refrigeração encontra-se terminada, como ilustrado na Figura 46.

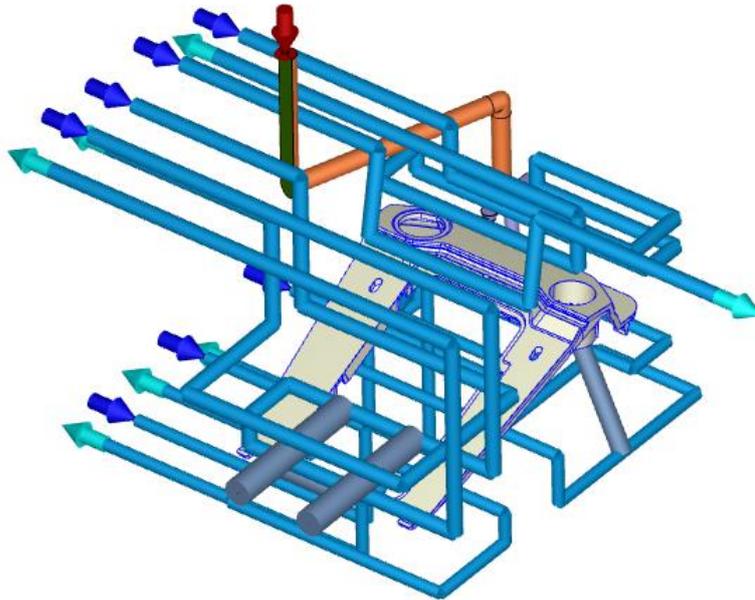


Figura 46. Modelação do sistema de refrigeração

Por outro lado, o molde da peça pode ser representado no Moldex3D® através da ferramenta *Moldbase*, com o objetivo de definir a área da superfície moldante para estudos térmicos (Anexo 2). Durante a construção, este elemento tem de apresentar dimensão suficiente para conter, no seu interior, todo o modelo, ou seja, peça, os canais de alimentação e refrigeração, não possuindo, portanto, as dimensões exatas do molde.

3.1.5 Construção da malha

Como último passo da conceção do modelo tem-se a construção da malha na peça, do sistema de alimentação e dos canais de refrigeração. A malha inicia-se com o conceito de *Seeding*, isto é, incrementos, onde o próprio *software* distribui vários nós ao longo da fronteira do domínio, ou seja, ao longo das arestas da peça. Avaliando a dimensão e espessura média da peça, o Moldex3D® recomenda quais os incrementos que se deve atribuir à peça, que no presente caso, sugere 4 mm. Por regra empírica, para uma melhor concisão de resultados, diminuiu-se este valor para a sua metade, obtendo-se assim uma malha global com distanciamento entre nós de 2mm. Porém, como a peça apresenta diversos detalhes, como por exemplo furos, sistemas de fixação, entre outros, é necessário alterar o incremento nestas secções.

Todos os furos presentes na peça, sistemas de fixação e ainda a zona final de enchimento da peça, apresentam uma malha com maior nível de refinação, sendo aplicada uma redução da distância entre nós de 2 mm para 1mm. No entanto, a malha apresenta maior densidade na zona final de enchimento, pois nesta zona ocorre a junção das duas frentes de fluxo e, portanto, com mais elementos nesta zona, é possível analisar com maior detalhe a linha de soldadura resultante.

É importante gerar uma malha superficial da peça de qualidade e sem erros, uma vez que, posteriormente, será construída automaticamente a malha tridimensional. A resolução de erros na malha é de carácter obrigatório, dada através de ferramentas no Moldex3D®, dedicadas exclusivamente a este efeito de malha.

No caso de estudo, a construção da malha como indicado, resultou num total de mais de 530 mil elementos (Anexo 3).

3.1.6 Material e Condições de Processamento

O Moldex3D® apresenta uma extensa biblioteca de materiais poliméricos, com mais de 8000 grades comerciais. Esta base de dados permite seleccionar o material que se pretende injetar, sendo no presente caso de estudo, o PC+ABS BAYBLEND T65, material especificado pelo cliente.

Segue-se a parametrização das condições de processamento, apresentadas na ficha técnica de injeção (Anexo 4). Neste caso de estudo, como a peça já está em produção em série, foi utilizado o modo Máquina dos *solvers* do Moldex3D®, sendo que este modo, admite a caracterização das máquinas de injeção, com a finalidade aproximar a diferença de resultados entre a simulação e o processo, devido à capacidade de considerar características físicas e respostas dinâmicas das injetoras

A introdução das condições de processamento, inicia pelo perfil de velocidades durante a fase de injeção e compactação, em relação à posição do fuso, ilustrado no Anexo 5. Posteriormente, é inserido o perfil de pressão dado apenas durante a fase de injeção, sendo neste caso, uma pressão constante até ao ponto de comutação, presente no Anexo 6. De seguida, é definido o ponto de comutação, o perfil de pressão e o tempo da fase de compactação. A comutação é dada tendo em conta a posição do fuso, iniciando-se quando este alcançar a posição de 40 mm. Relativamente à fase de compactação, esta ocorre durante 8 segundos, com o perfil de pressões descrito no Anexo 7.

Em seguida, é definida a temperatura do fundido na entrada do canal quente e do molde. Como a unidade de plasticização é constituída por seis resistências, considera-se a temperatura da última, introduzindo-se, deste modo, 270°C como sendo a temperatura do fundido. Em relação ao molde, este apresenta uma temperatura de 70°C, tanto na cavidade como na bucha. Além disso, selecciona-se o tipo

de aço que constitui o molde, sendo que neste caso, o aço pré-tratado *1,2343*. Por fim, é definida a temperatura ambiente (25°C), o tempo da fase de arrefecimento (25s) e a temperatura de ejeção da peça, definida para 100°C (entre 30°C a 40°C abaixo da temperatura de transição vítrea – $T_g = 135^\circ\text{C}$).

Seguidamente, define-se a tipologia de simulação que se pretende realizar, definindo-se uma análise transiente (Ct, F, P, Ct, W). Esta consiste, inicialmente, numa análise térmica transiente (Ct), posteriormente a fase de enchimento (F), a fase de compactação (P), arrefecimento (Ct) e, por fim, o cálculo da contração e empeno (W).

3.2 Validação do Modelo

O Moldex3D®, como revisto anteriormente, assenta sobre modelos matemáticos que tendem a descrever os fenómenos físicos ocorridos durante as várias fases do processo de injeção. Sobre os modelos que regem o comportamento do escoamento e sobre o método numérico aplicável para resolver o problema (FEM), incidem simplificações geométricas e paramétricas que, promovem divergências entre os resultados de simulação e do processo real. Assim, com o objetivo de validar o modelo construído em Moldex3D®, para assim ser possível prever, no processo inverso (Moldex3D® - Máquina) defeitos estéticos com exatidão, é fundamental definir uma metodologia de comparação de dados para efeitos de aprovação do modelo construído.

Deste modo, a validação inicia-se através da comparação entre os perfis de pressão ao longo do tempo, sendo a semelhança entre ambos, indicativo de escoamentos com velocidades e localizações semelhantes, tratando-se, portanto, como o principal ponto de validação. Além disso, um outro fator a comparar é a localização das linhas de soldadura, indicando comportamentos de escoamento semelhantes entre a simulação e o real.

3.2.1 Gráficos de Pressão vs. Tempo

Analisando os resultados referentes ao gráfico de pressão (Figura 47) verifica-se que o modelo calculou, de forma praticamente semelhante, os mesmos valores de pressão dados no processo real. No entanto, aproximadamente aos 3s, após o fim do enchimento, ocorre o ponto de comutação, onde a queda de pressão prevista na simulação é superior ao experimental. No caso real, esta queda de pressão de injeção deve-se a uma comutação prematura, onde a cavidade não apresenta um enchimento volumétrico total, sendo que segundo o Moldex3D®, o enchimento apresenta o valor aproximado de

94%. Assim, a fase de pressurização terá de completar inicialmente o enchimento dos 6% de volume de peça restante, e posteriormente, inicia-se a compactação da peça.

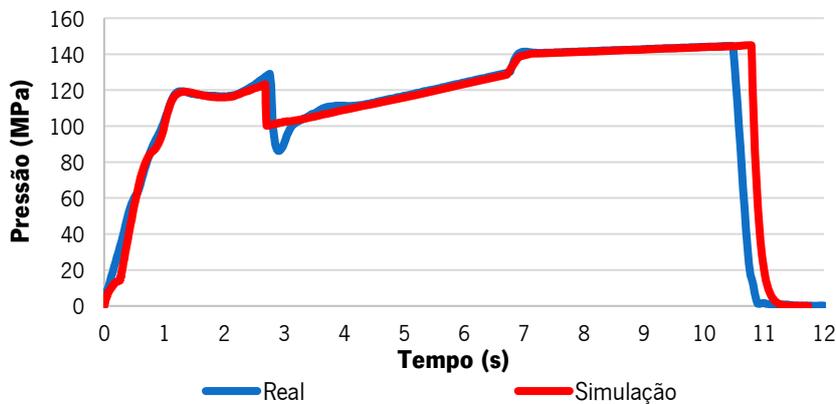


Figura 47. Comparação do gráfico de pressão de injeção

O Moldex3D® apresenta limitação na capacidade de simulação de comutação prematura, sendo que, o algoritmo aparenta apenas iniciar a fase de compactação quando a cavidade apresentar o enchimento volumétrico completo. Tal implica um ineficaz cálculo das quedas de pressão, bem como um desfasamento no tempo total de ciclo (cerca de 0.2s) que se verifica no final do gráfico.

Para calcular o desvio entre as duas curvas de pressão aplicou-se a fórmula matemática descrita pela Equação 3. Foram seleccionados 20 pontos, em incremento de tempo igual a 0,5s, para a monitorização e comparação dos valores das quedas de pressão (Tabela 1).

$$Desvio (\%) = \left(\frac{|P_{simulação} - P_{real}|}{P_{real}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Tabela 1. Cálculo do desvio entre curvas

Tempo (s)	Máquina	Simulação	Desvio da Curva	
	Pressão (MPa)	Pressão (MPa)		
0	0.7	0.6	0.089	8.88%
0.5	60.2	60.3	0.001	0.11%
1	103.3	96.0	0.071	7.10%
1.5	117.7	113.7	0.034	3.43%
2	116.6	112.4	0.036	3.63%
2.5	123.3	120.0	0.027	2.71%
3	90.3	101.8	0.127	12.74%
3.5	107.2	104.9	0.021	2.11%
4	111.3	109.4	0.018	1.75%
4.5	113.2	112.5	0.006	0.64%
5	116.9	116.7	0.002	0.21%
5.5	120.6	119.7	0.007	0.71%
6	124.3	122.9	0.011	1.13%
6.5	128	127.8	0.002	0.19%
7	141.4	139.4	0.014	1.41%
7.5	141	140.7	0.002	0.22%
8	141.6	141.5	0.001	0.07%
8.5	142.2	142.1	0.001	0.10%
9	142.8	142.6	0.001	0.13%
9.5	143.4	143.2	0.001	0.15%
10	144.1	143.8	0.002	0.23%
Média do desvio			1.75%	

O ponto de queda pressão relativo aos 3s não foi considerado uma vez que coincide com o período no qual o software não possui a capacidade de comutar o perfil de pressões. A avaliação destes resultados pontualmente permite perceber que a média do desvio é de apenas 1,75% entre o processo real e simulação o que torna este processo de simulação bastante aproximado com a realidade.

3.2.2 Localização das linhas de soldadura

A localização das linhas de soldadura indicam a zona de convergência entre duas ou mais frentes de fluxo, sendo a comparação entre o real com o calculado pelo Moldex3D® indicativo de velocidades de escoamento semelhantes, ou seja, o fluxo flui de forma idêntica em ambos os casos.

Tendo como comparação a Figura 48, é possível verificar que o fluxo, devido à geometria, é sujeito a várias divisões, resultando em várias linhas de soldadura. Na peça real, as linhas foram realçadas de modo a tornarem-se visíveis para efeitos de comparação, sendo possível, em primeira análise, verificar a igualdade da localização das linhas entre o caso modelado pelo Moldex3D® e o caso real. Esta validação, indica que o fluxo percorreu a cavidade com velocidades idênticas ao real, permitindo assim, assegurar a validação do modelo.

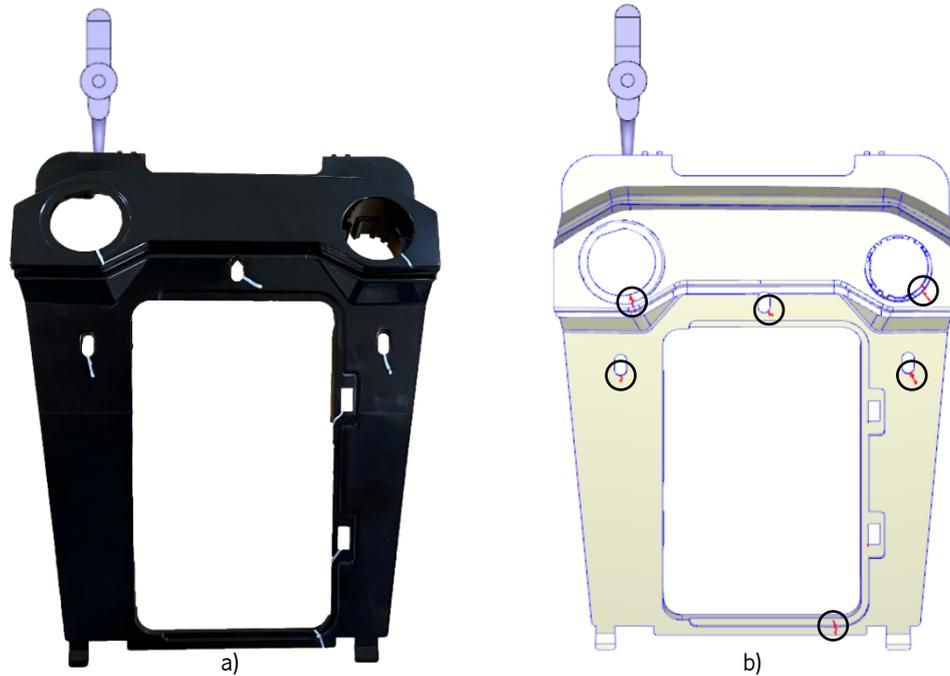


Figura 48. Localização e comparação das linhas de soldadura: (a) caso real; (b) caso modelado pelo Moldex3D®

No entanto, é possível verificar certas divergências nos comprimentos das linhas de soldadura e uma ligeira diferença de localização na última linha de soldadura. Estas disparidades possivelmente ocorrem devido às simplificações efetuadas sobre a geometria, visto terem ocorrido eliminações de *fillets* com dimensões até 1mm. Além disso, um outro motivo deve-se, provavelmente, devido às generalizações nos modelos matemáticos associados às linhas de soldadura.

Capítulo 4 – Produção e Avaliação de DOE's

4.1 Produção de DOE's

A qualidade final das peças moldadas pelo processo de injeção, encontra-se relacionada a vários fatores, desde o design, as propriedades do material, as condições de processamento, entre outros. A aplicação do método convencional, isto é, tentativa-erro, tem como finalidade avaliar o efeito de cada fator, porém, traduz-se em ensaios morosos e com custo associado elevado. De modo a definir efetivamente os fatores-chave para alcançar a máxima qualidade da peça, com o benefício de redução de custos, é vantajoso adotar a abordagem experimental de DOE (*Design of Experimentals*). O DOE é uma metodologia que admite a combinação de vários fatores, com a finalidade de determinar a relação existente entre o fator e a resposta desenvolvida, para assim ser possível otimizar o processo [87].

O DOE Wizard do Moldex3D® essencialmente é dividido em dois fatores, qualidade e controlo. Os fatores de controlo referem-se aos parâmetros de processo a serem otimizados e os fatores de qualidade definem o objetivo da otimização, ou seja, o fator a melhorar. Após definição de ambos os fatores, o *software* aplica o método Taguchi ou o método de *Full Factorial Experiments* [88].

A construção dos DOE's, para efeito de estudo dos defeitos estéticos mencionados, foi fundamentada na literatura científica descrita no Capítulo 2. Portanto, foram assim definidos os fatores de controlo e os fatores de qualidade, sendo este último limitado tendo em conta as capacidades do *software*.

4.1.1 DOE's – Linhas de Soldadura

Com base no capítulo 2.2.3.1 e com o auxílio das Figura 23 e 24, é possível verificar o efeito das condições de processamento sobre as linhas de soldadura. As temperaturas do molde e do fundido são as principais condições que influenciam diretamente a visibilidade da linha, procedendo sobre a largura e a profundidade do respetivo efeito. Desta forma, como fatores de controlo (Tabela 2), foram introduzidas as devidas temperaturas com três níveis de variação, sendo o nível dois, um intermédio com condições iguais ao processo de produção atual (Anexo 4).

Tabela 2. DOE de Linhas de Soldadura: Fatores de Controlo

#	Fator de Controlo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
1	Temperatura de fundido [°C]	240	270	300
2	Temperatura do molde [°C]	50	70	90

Como fatores de qualidade, verifica-se na literatura que as propriedades finais das linhas de soldadura podem ser classificadas consoante o ângulo de união das duas frentes de fluxo. Porém, apesar do Moldex3D® calcular o ângulo em análise da fase de enchimento, este não é definido como fator de qualidade no DOE Wizard. Portanto, tendo em conta esta limitação, ocorre a necessidade de associar fatores secundários ao efeito, tais como temperatura da frente de fundido e temperatura média durante a fase de compactação (Tabela 3).

Tabela 3. DOE de Linhas de Soldadura: Fatores de Qualidade

#	Fator de Qualidade	Objetivo	Peso
1	Temperatura da frente de fundido na fase de enchimento	Maximizar	2
2	Temperatura média na fase de compactação	Maximizar	1

Após definir os fatores de qualidade estabelece-se o objetivo e o peso, tal como requerido pelo Moldex3D®. O objetivo refere-se ao que se pretende com o fator, podendo este ser classificado como: máximo, mínimo, uniforme ou definido numericamente. De forma a exemplificar o conceito, uma frente de fundido com temperatura elevada tende a melhorar as propriedades da linha de soldadura. Portanto, o objetivo prende-se por determinar a condição otimizada que promova o máximo de temperatura da frente de fundido na fase de enchimento. O peso indica a percentagem de valor acrescentado sobre o fator, ou seja, neste caso o fator um predomina sobre o fator dois.

Assim sendo, o DOE tem como objetivo final determinar a condição otimizada que tende a maximizar ambos os fatores de qualidade, com ênfase no primeiro fator.

4.1.2 DOE's - Chupados

Tendo como auxílio o capítulo 2.2.3.2 e a Figura 29, 30 e 31 é possível definir os fatores de controlo que tendem a influenciar a formação dos chupados. Constatou-se nas referidas figuras que a temperatura de fundido e do molde, a pressão e o tempo de compactação são as condições principais que incidem de forma direta sobre o efeito, completando-se assim a Tabela 4. Os valores de nível dois

correspondem aos valores de processo aplicados na produção da respetiva peça, sendo definido um nível com valores inferiores e superiores.

Tabela 4. DOE de Chupados: Fatores de Controlo

#	Fator de Controlo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
1	Tempo de compactação [s]	4	8	12
2	Pressão de compactação [MPa]	120	145	170
3	Temperatura de fundido [°C]	240	270	300
4	Temperatura do molde [°C]	50	70	90

Para os fatores de qualidade, o *software* apresenta uma métrica associada ao efeito de chupados, como indicado na Tabela 5, onde determina a contração volumétrica em todo o volume da peça. Contudo, de modo a obter resultados mais exatos e aplicados unicamente sobre os chupados, os fatores deveriam incidir sobre o deslocamento ocorrido na superfície da peça (*Sink mark displacement*) ou no indicador (*Sink mark indicator*) que informa da necessidade de uma compactação superior. Estes elementos de avaliação encontram-se disponíveis para análise dos resultados de simulação, porém, indisponíveis para os fatores de qualidade no DOE Wizard.

Tabela 5. DOE de Chupados: Fatores de Qualidade

#	Fator de Qualidade	Objetivo	Peso
1	Contração volumétrica	Maximizar	1

Na mesma linha de raciocínio descrita anteriormente, após definir o fator de qualidade, tem-se de especificar o objetivo a pretender com o fator e qual o peso em relação a outro. Neste caso específico, pretende-se determinar a condição de processamento que promova a maior nível de contração volumétrica, sendo o peso igual a um, visto apenas ter sido selecionado um fator.

Após construção de ambos os DOE's prossegue-se para a fase de cálculo através da execução de uma análise transiente (Ct, F, P, Ct, W), sendo que cada DOE originou 9 *run's* mais uma condição otimizada. Após finalização do cálculo, cada *run* será analisada individualmente, com o intuito de recolher dados acerca dos defeitos. Relativamente às linhas de soldadura analisa-se o ângulo e temperatura das linhas de soldadura e para os chupados considera-se os deslocamentos ocorridos superficialmente.

4.2 Avaliação preliminar de DOE's

4.2.1 Linhas de soldadura

Tal como revisto anteriormente na construção dos DOE's, é impossível ter um fator de qualidade sobre os ângulos das respetivas linhas. De modo a contrariar esta limitação, é realizada uma análise pontual de cada *run*, sendo possível obter dados relativos à variação do ângulo e temperatura, como apresentado na Tabela 6. Posteriormente, pelos dados obtidos das simulações, são selecionadas condições de processo que promovam ângulos superiores à condição base (verde) e condições com o efeito inverso (vermelho). Tendo em conta os fatores de qualidade definidos anteriormente, o Moldex3D® definiu a *run* 4 como sendo a condição otimizada, isto é, a condição que conduz a maiores temperaturas de frente de fundido durante a fase de enchimento e de compactação.

Tabela 6. Avaliação de DOE's das linhas de soldadura

RUN	Temperatura do molde [°C]	Temperatura de fundido [°C]	Ângulo máximo	Ângulo mínimo	Temperatura [°C]
Base	70	270	70	18	280
1	90	240	120	22	261
2	70	240	115	24	261
3	50	240	93	23	261
4	70	300	87	20	302
5	50	300	não ilustrada		-
6	50	270	não ilustrada		-
7	90	270	52	22	280
8	90	300	53	5	300
9	70	270	70	18	280
10	70	300	87	20	302

Através da análise da respetiva tabela, é possível, desde logo, destacar certas divergências nos resultados quando comparados com a revisão bibliográfica efetuada no capítulo 2.2.3.1. O aumento de temperatura do molde, dado na passagem da *run* base para a 7, teoricamente, deveria promover uma linha de soldadura de maior qualidade. No entanto, verifica-se que os ângulos tenderam a diminuir, ou seja, uma linha de soldadura de qualidade inferior à *run* base. O mesmo ocorre na comparação entre a *run* 4 e 8, podendo-se, deste modo, prever possíveis dificuldades na definição de métricas para o efeito em causa.

Além disso, uma outra divergência verificada nos dados de simulação decorreu na não representação gráfica de linhas de soldadura, como verificado nas *run's* 5 e 6, presente na Figura 49. A figura ilustra a zona final do enchimento, onde o *software* não presumiu nenhuma linha de soldadura, embora ocorra o contacto entre duas frentes de fundido.

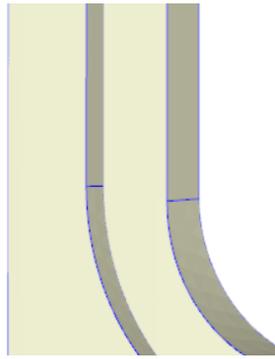


Figura 49. RUN 4 - Linha de soldadura não ilustrada

Tendo em conta esta variabilidade de representação e cálculo de linhas de soldadura, induz-se possíveis imprecisões ou variações na fase de cálculo numérico. Porém, com a análise morfológica da linha de soldadura, tornar-se-á possível verificar a viabilidade dos resultados apresentados pretendendo-se, como efeito de análise, comparar e relacionar o efeito de ângulos calculados pelo Moldex3D® com a geometria do entalhe em V.

4.2.2 Chupados

Na mesma linha de raciocínio anterior, analisam-se todas as *run's* com a finalidade de selecionar condições de processo que minimizem e maximizem o efeito de chupado, tendo como comparação o valor de deslocamento ocorrido na superfície A da peça (zona visível), apresentado na Tabela 7. Esta triagem de condições tem como objetivo prosseguir para a máquina de modo a injetar peças e, posteriormente, avaliar o defeito de modo a ser possível definir métricas em Moldex3D®.

Tabela 7. Avaliação de DOE's dos chupados

DOE-Chupados					
RUN	Tempo de compactação (s)	Pressão de compactação (MPa)	Temperatura de fundido [°C]	Temperatura do molde [°C]	Chupado: Superfície A (mm)
Base	8	145	270	70	0.006
1	8	170	240	70	0
2	12	170	270	50	0
3	12	145	240	90	0.004
4	4	120	300	90	0.027
5	4	120	240	50	0.023
6	12	120	300	70	0.010
7	8	120	270	90	0.014
8	4	145	270	70	0.011
9	8	145	300	50	0.009
10	4	170	300	90	0.008

Tendo como análise a referida tabela, é possível verificar que, de uma forma genérica, os resultados estão de acordo com os aos conceitos teóricos descritos no Capítulo 2.2.3.2. Segundo Singh Solanki et al. [33] e tendo em conta os resultados obtidos na Tabela 8, com auxílio do *Minitab®*, constatou-se que, a pressão de compactação é o fator com maior influência sobre a perçetibilidade dos chupados, em linha com a conclusão do autor. Contudo, o tempo de compactação, classificado como o segundo fator, tende a diminuir os chupados, divergindo, neste caso, da opinião do referido autor.

No entanto, ambos os fatores indicados, são dependentes e limitados pelo tempo de solidificação do ataque, visto que, com o decorrer do tempo de arrefecimento, a capacidade de compactação diminui progressivamente. Por fim, a temperatura de fundido, surge como o fator de menor influência na formação de chupados, sendo que o seu aumento tende a proporcionar o aparecimento de chupados nas peças.

Como referido anteriormente, os chupados apresentam diferentes respostas às condições de processo, sendo tal verificado pela própria literatura. Deste modo, não possuem uma solução única, estando dependentes de inúmeros fatores associados, variando de peça para peça.

Tabela 8. Resposta médias para os chupados

Nível	Tempo de compactação	Pressão de compactação	Temperatura de fundido	Temperatura do molde
1	0.014000	0.015667	0.009000	0.010667
2	0.007667	0.008000	0.008333	0.007000
3	0.004667	0.002667	0.009000	0.008667
Delta	0.009333	0.013000	0.000667	0.003667
Posto	2	1	4	3

5.1. Técnica de Avaliação das Linhas de Soldadura

O *Alicona Infinite Focus SL* (Figura 50) é um equipamento de medição ótico 3D de alta resolução que aplica a tecnologia de microscopia de foco variável (MFV), com a finalidade de gerar imagens e medição da respetiva superfície [89]. O funcionamento do equipamento pode ser dividida em três etapas principais:

- 1. Iluminação e Captura de Imagem:** o equipamento possui uma fonte de luz LED, onde, através da presença de um espelho de divisão de feixe, a luz é inserida sobre o caminho ótico do sistema e focada na amostra através da objetiva. Através da projecção continuada do feixe de luz na superfície, de forma paralela, uma câmara CCD de alta resolução captura as imagens em tempo real. Através da variação do ângulo de reflexão do feixe de luz, o sistema é capaz de capturar imagens de diferentes profundidades, permitindo assim a construção tridimensional da amostra.
- 2. Análise da Imagem:** a imagem capturada é processada pelo *software* aplicando a técnica de MFV de modo a gerar uma imagem 3D. A MFV é aplicável a superfícies com grande variedade de valores de refletância ótica, causa de possíveis variações de brilhante a refletivo difuso, de material homogêneo a composto e de propriedades de superfície lisas a rugosas. A tecnologia supera as limitações de medição em termos de refletância por meios de combinação de iluminação, de controlo dos parâmetros do sensor e polarização integrada;
- 3. Medição das Dimensões:** o *software* do equipamento permite gerar uma imagem tridimensional nítida e detalhada, admitindo a medição de diversas dimensões da superfície, sendo neste específico caso, aplicado para medição da largura e profundidade do entalhe em V da linha de soldadura [90]



Figura 50. Equipamento de medição - *Alicona Infinite Focus SL*

A precisão do equipamento é dependente de diversos fatores, como a resolução da câmara, o tipo de objetiva, neste caso de 10x, e as condições de iluminação durante a medição. Além disso, a precisão é ainda dependente das características da amostra em estudo. No entanto, em geral, o sistema é capaz de atingir uma precisão de medição na ordem dos nanômetros, porém, a zona disponível de análise é limitada a uma área de 2mm por 2mm.

5.2. Análises de resultados – Linhas de Soldadura

5.2.1. Tratamento de dados

Através das capacidades de medição por parte do equipamento, devido à aplicação simultânea da tecnologia de microscopia de foco variável e propriedades de reflexão da luz, é possível elaborar o perfil de forma da linha de soldadura. Inicialmente, o *software* do microscópio gera uma imagem de superfície na zona da linha de soldadura, ilustrado na Figura 51, sendo definido, posteriormente, a área de medição, assinalada a vermelho.

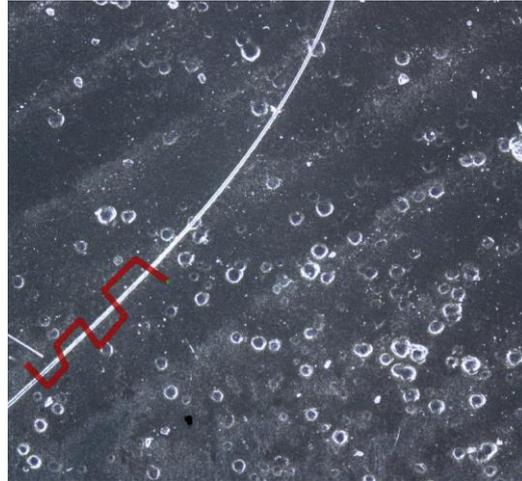


Figura 51. Run 1 - Medição do perfil de forma

Após definida a área de estudo, são fornecidos dados do perfil de forma da superfície ao longo do comprimento, como é possível analisar na Figura 52. Na respectiva figura, é possível verificar cinco picos de maior profundidade, correspondentes às cinco interseções da área definida anteriormente, sobre a linha de soldadura. As restantes oscilações resultam de rugosidades na superfície, sendo que, para melhor compreensão e avaliação de resultados, estes dados não serão considerados.

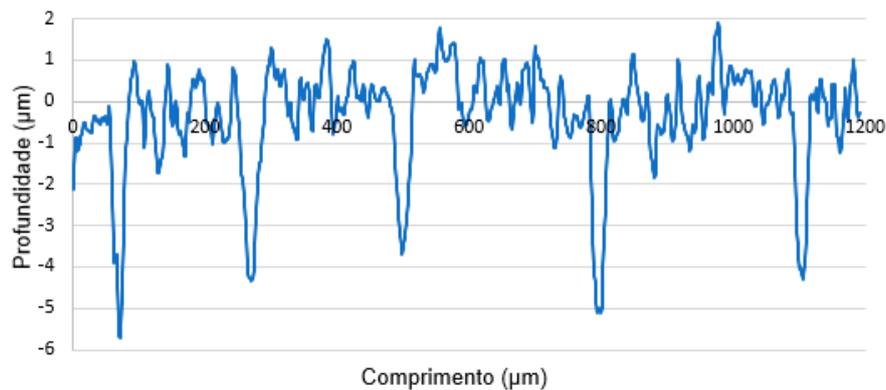


Figura 52. Run 1 - Perfil de forma

Portanto, inicialmente ajusta-se a curva à origem do eixo da profundidade, necessidade devido ao desnível da peça na zona de inspeção, e, posteriormente, excluem-se as oscilações resultantes da rugosidade superficial, originando, a título de exemplo, um gráfico como ilustrado na Figura 53.

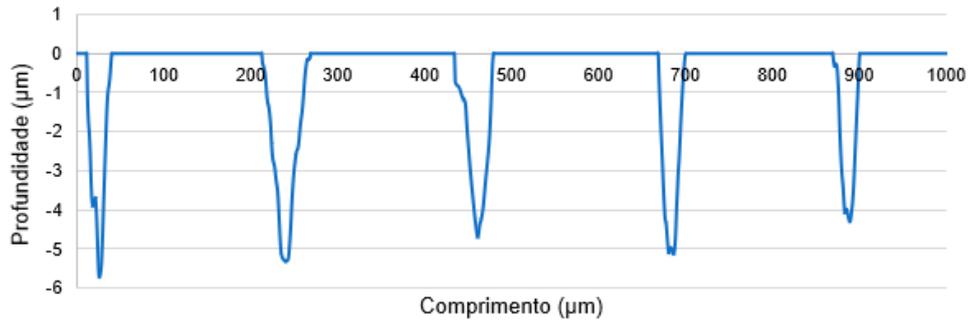


Figura 53. Run 1 - Eliminação das rugosidades do perfil de forma

Com o objetivo de ter resultados concisos sobre a real profundidade e largura da linha de soldadura, sob cada grupo definido na Tabela 6, analisaram-se três peças, sendo que em cada peça, é efetuada a medição da linha em 5 pontos.

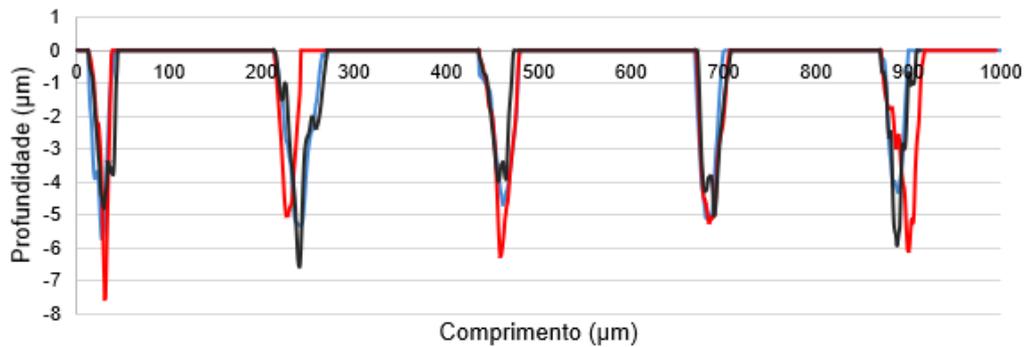


Figura 54. Run 1 - Perfil de forma das três medições das linhas de soldadura

Deste modo, obtém-se três curvas em cada grupo como ilustrado na Figura 54, sendo, posteriormente, necessário calcular uma curva média representativa da evolução da linha de soldadura de cada amostragem, apresentado na Figura 55. A referida curva é o ponto de comparação entre as várias amostragens, com a finalidade de verificar as condições que tendem a promover linhas de soldadura com propriedades estéticas superiores e, subsequentemente, a definição de métricas.

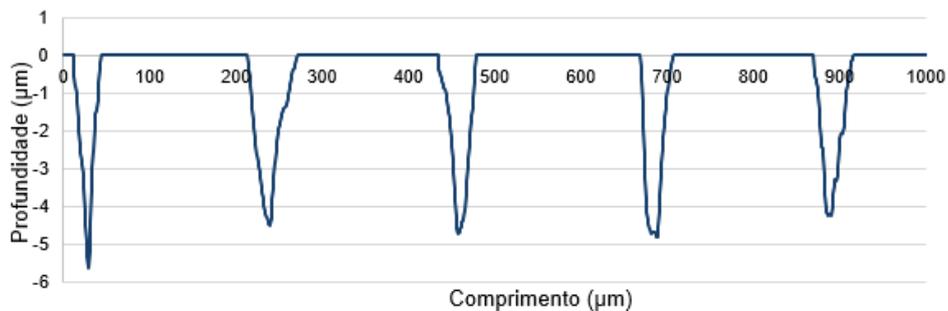


Figura 55. Run 1 - Perfil de forma médio

5.2.2. Linhas de Soldadura – Discussão de resultados

Na Figura 56 encontram-se ilustradas as curvas morfológicas das medições das linhas de soldadura da amostragem base e das amostragens com diferentes condições. As curvas representadas resultam de condições de processo que, segundo o Moldex3D®, conduzem a ângulos de contacto superiores em relação à base, como apresentado na Tabela 6. Com a seguinte avaliação, pretende-se comparar os resultados entre o *software* e a medição das linhas, com o intuito de determinar uma razão sobre a evolução do defeito entre o processo real e o virtual.

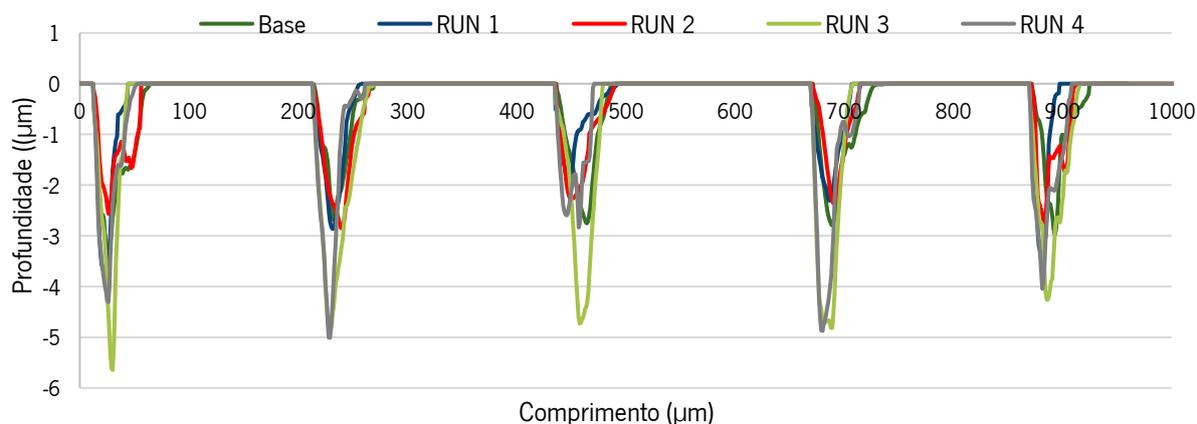


Figura 56. Curva morfológica das linhas de soldadura

Com base nos dados numéricos do gráfico da Figura 56, determinou-se, de forma analítica, a profundidade e largura da linha de soldadura com base na média dos cinco pontos de medição. Estes dados encontram-se apresentados na Tabela 9, Figuras 57 e 58, para efeitos de comparação e discussão.

Tabela 9. Resultados estatísticos das linhas de soldadura

RUN	Profundidade (µm)	Largura (µm)	Ângulos
Base (70°C; 270°C)	2,79 ± 0,20	51,14 ± 2,09	70° - 18°
RUN 1 (90°C; 240°C)	2,86 ± 0,64	25,07 ± 3,87	120° - 22°
RUN 2 (70°C; 240°C)	2,56 ± 0,22	39,13 ± 3,98	115° - 24°
RUN 3 (50°C; 240°C)	4,87 ± 0,45	41,15 ± 7,40	93° - 23°
RUN 4 (70°C; 300°C)	4,31 ± 0,78	39,11 ± 4,27	87° - 20°

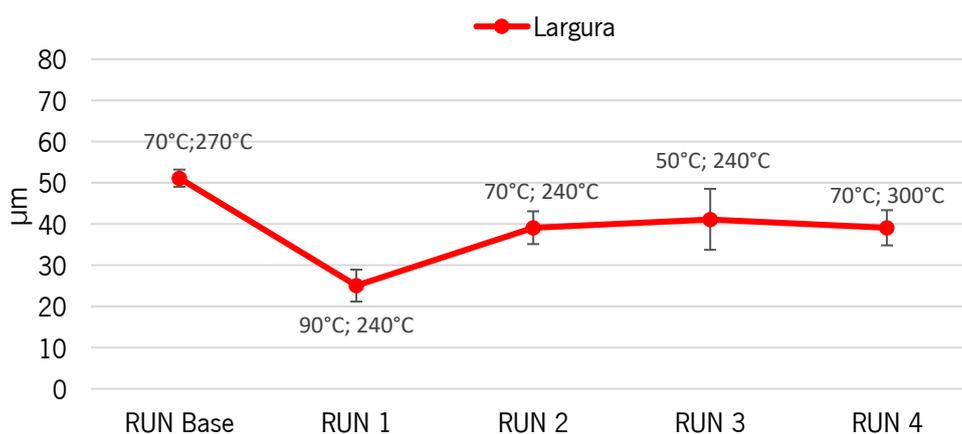


Figura 57. Evolução da largura das linhas de soldadura

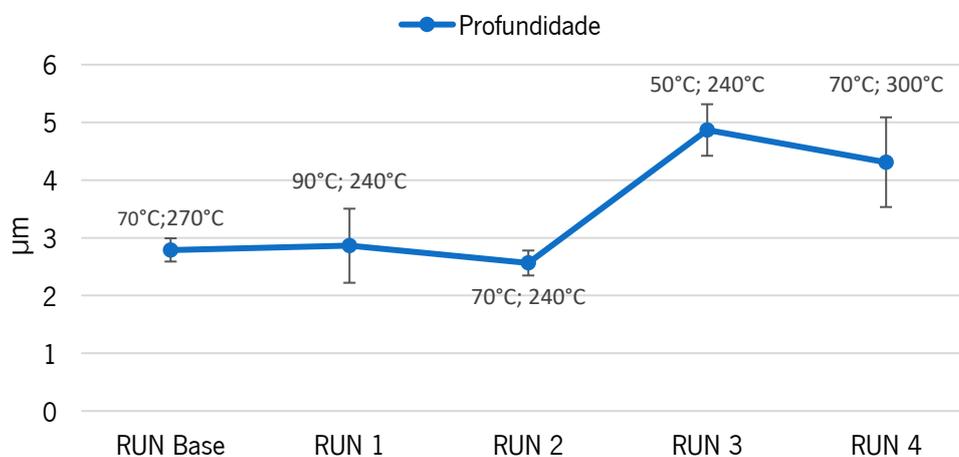


Figura 58. Evolução da profundidade das linhas de soldadura

De acordo com a revisão do estado de arte, Capítulo 2, aferiu-se que as temperaturas de fundido e do molde são o principal fator atuante sobre a geometria das linhas de soldadura, destacando-se particularmente a temperatura do molde. A diminuição sucessiva da respectiva temperatura, promove o aumento constante da largura do entalhe, sendo este fenômeno verificado, quando comparando as *run's* 1, 2 e 3, como ilustrado na Figura 57. As *run's* 1, 2 e 3 dispõem, respectivamente, temperaturas do molde de 90°C, 70°C e 50°C, tendo a largura, um comportamento crescente. Comparando as referidas *run's*, no entanto, relacionando a profundidade, apresentado na Figura 58, averigua-se que a profundidade apresenta a mesma tendência que a descrita para a largura. Esta tende a aumentar com a diminuição da temperatura do molde, apresentando, no entanto, dependência da temperatura de fundido, verificado quanto analisado as *run's* 1 e 4.

Tendo em comparação a condição base com a *run* 1, apesar da profundidade possuir um ligeiro aumento de 2,6% ($\approx 0,07\mu\text{m}$), a largura decresceu, aproximadamente, 51% ($\approx 26,07\mu\text{m}$). Equiparando a condição base com a *run* 2, o decréscimo somente da temperatura de fundido, proporcionou uma diminuição da profundidade de 8,1% ($\approx 0,23\mu\text{m}$), como também da largura de 23,5% ($\approx 12,01\mu\text{m}$). Em relação à *run* 3, a largura permaneceu com o mesmo comportamento, ou seja, inferior à base 19,5% ($\approx 10\mu\text{m}$), porém, a profundidade aumentou consideravelmente 74,5% ($\approx 2,08\mu\text{m}$).

Tendo por base a *run* 4, o aumento da temperatura de fundido promoveu à diminuição da largura da linha de soldadura em 23,5% ($\approx 12,03\mu\text{m}$) e o aumento da profundidade em 54,5% ($\approx 1,52\mu\text{m}$), comparativamente à *run* base. No entanto, relacionando a *run* 3 e 4, apesar de ter ocorrido uma diminuição dos ângulos, é possível constatar uma contradição, visto a geometria do entalhe ter melhorado ligeiramente. Deste modo, analisando as duas *run*'s no Moldex3D®, verificou-se que a linha de soldadura da *run* 4 deslocou-se aproximadamente 4mm, como é possível constatar na Figura 59.

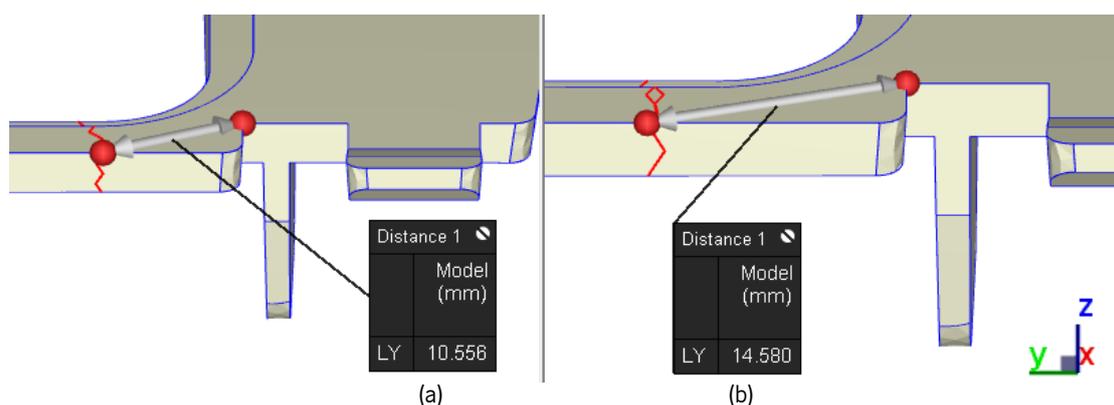


Figura 59. Deslocação da linha de soldadura: (a) *Run* 3 (b) *Run* 4

A movimentação da linha de soldadura no eixo y, permitiu que o fluxo adquirisse um escoamento mais uniforme e paralelo entre as duas frentes, ao contrário do sucedido na *run* 3. O fluxo da *run* anterior move-se num escoamento em curva e, imediatamente, alcança uma outra frente de fundido. Assim, visto as duas frentes de fundido na *run* 4 se deslocarem numa secção transversal idêntica, proporcionou à maior uniformidade de escoamento entre as duas frentes de fluxo, e, por consequência, ângulos de contacto ligeiramente inferiores.

De uma forma geral, as *run*'s 1, 2, 3 e 4 apresentam melhorias significativas que, possivelmente, induzem em melhores propriedades estéticas e mecânicas que a condição base. Porém, as condições da *run* 3 e 4 promovem a um aumento da profundidade, sendo assim necessário compreender quais os fatores, largura ou profundidade, afetam, com maior intensidade, a estética final da peça. Deste modo,

as peças serão submetidas ao processo de pintura, com o intuito de verificar a capacidade de revestimento sobre a linha de soldadura e, portanto, aferir se a linha continua visível ou não.

Por outro lado, na Figura 60 encontram-se caracterizadas as curvas morfológicas das condições de processo que, segundo o Moldex3D®, originam linhas de soldadura com ângulos inferiores, e, conseqüentemente, propriedades inferiores, apresentados na Tabela 6.

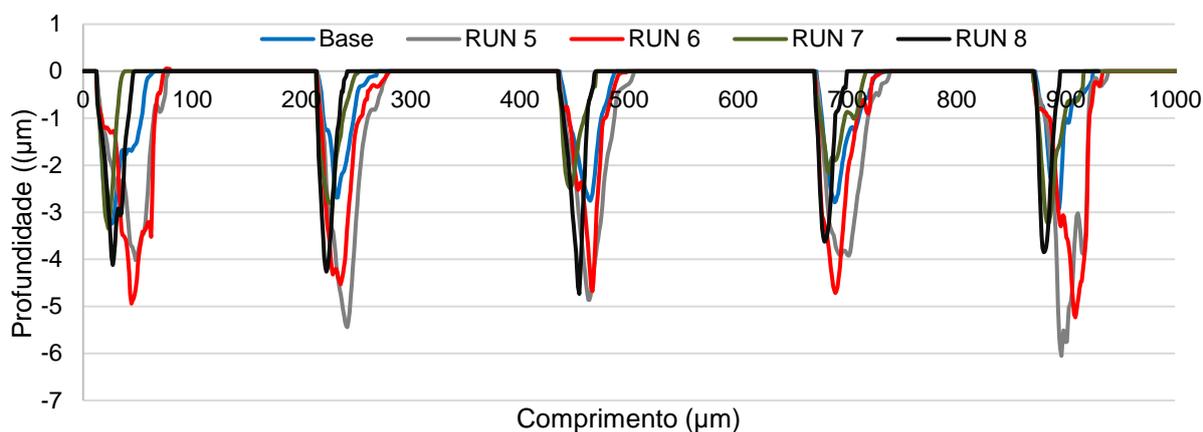


Figura 60. Curva morfológica das linhas de soldadura

Assim sendo, a análise dos seguintes dados, Tabela 10, Figuras 61 e 62, tem como intuito verificar se as linhas de soldadura, apresentam propriedades inferiores (maior largura e profundidade), tal como indicado de forma indireta, pelo cálculo de ângulos do Moldex3D®.

Tabela 10. Resultados estatísticos das linhas de soldadura

RUN	Profundidade (μm)	Largura (μm)	Ângulo
Base (70°C; 270°C)	2,79 ± 0,20	51,14 ± 2,09	70° - 18°
RUN 5 (50°C; 300°C)	4,86 ± 0,82	65,98 ± 1,65	não ilustrada
RUN 6 (50°C; 270°C)	4,82 ± 0,24	63,20 ± 2,09	não ilustrada
RUN 7 (90°C; 270°C)	2,81 ± 0,45	37,28 ± 7,94	52° - 22°
RUN 8 (90°C; 300°C)	4,12 ± 0,38	27,57 ± 4,04	53° - 5°

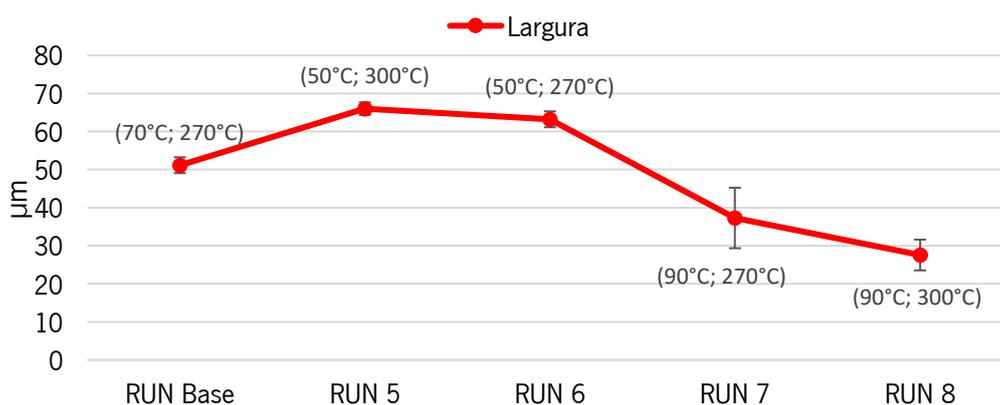


Figura 61. Evolução da largura das linhas de soldadura

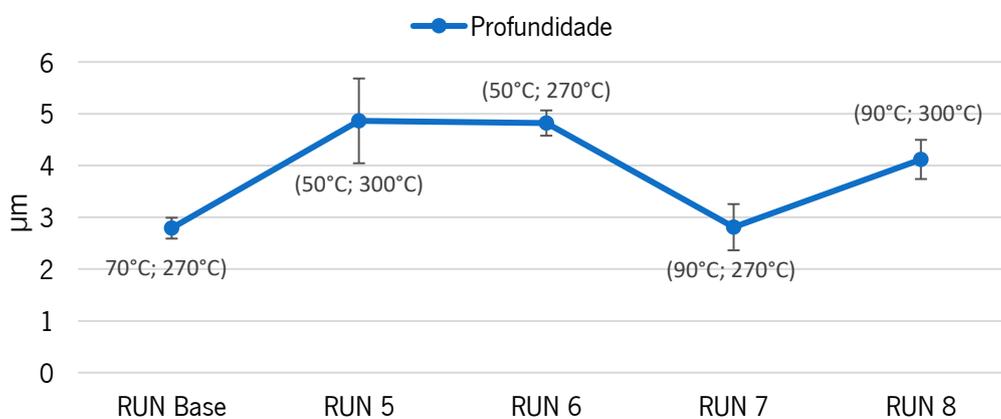


Figura 62. Evolução da profundidade das linhas de soldadura

De um ponto de vista geral, observando as *run's* 5, 6, 7 e 8 na Figura 61, é possível verificar uma tendência de resultados, visto ocorrer um comportamento decrescente da largura das linhas de soldadura com o aumento dos ângulos calculados pelo *software*. No entanto, a tendência não se mantém totalmente de acordo quando analisado a variação da profundidade na Figura 62. Realça-se assim, a necessidade de verificar qual dos fatores geométricos, tende a afetar com maior significância o processo de revestimento da peça. Para além disso, adicionado comparativamente os dados de profundidade anteriores, Figura 58, confere-se que, a profundidade não apresenta uma evolução tendo em conta a variação de ângulos, ao contrário da largura.

As condições da *run* 5, relativamente à base, proporcionaram um aumento da largura de 29,0% ($\approx 14,84\mu\text{m}$), como também um aumento da profundidade de 74,3% ($\approx 2,07\mu\text{m}$), classificando-se como a pior linha de soldadura em termos geométricos. A esta característica, encontra-se ainda associado o facto de o Moldex3D® não ilustrar a linha de soldadura na zona final de enchimento. A imprevisão do *software* ocorreu novamente na *run* 6, obtendo-se, de igual modo, resultados desfavoráveis

comparativamente à base e valores próximos à *run* anterior. Assim sendo, a semelhança existente entre a *run* 5 e 6 em termos de dimensões e de *software*, permitem associar as más linhas de soldadura à sucessiva falta de representação por parte do Moldex3D®.

A *run* 7 é definida somente por um aumento da temperatura do molde, quando comparado à condição base. Posto isto, de acordo com a teoria, tal variação de temperatura irá provocar uma diminuição da largura da linha de soldadura, sendo isto comprovado com os resultados obtidos. Obteve-se assim uma redução da largura de 27,1% ($\approx 13,86\mu\text{m}$), tendo a profundidade aumentando ligeiramente ($0,7\% \approx 0,02\mu\text{m}$). No entanto, em termos de resultados no Moldex3D®, ocorreu uma certa contradição, visto esta apresentar ângulos inferiores à condição de referência, mas no geral, dispor de propriedades superiores. O fator deslocamento foi avaliado entre as duas *run*'s, porém, apresentam distâncias iguais, sendo a variação do ângulo dada, provavelmente, devido ao cálculo incompleto da linha de soldadura, como apresentado na Figura 63.

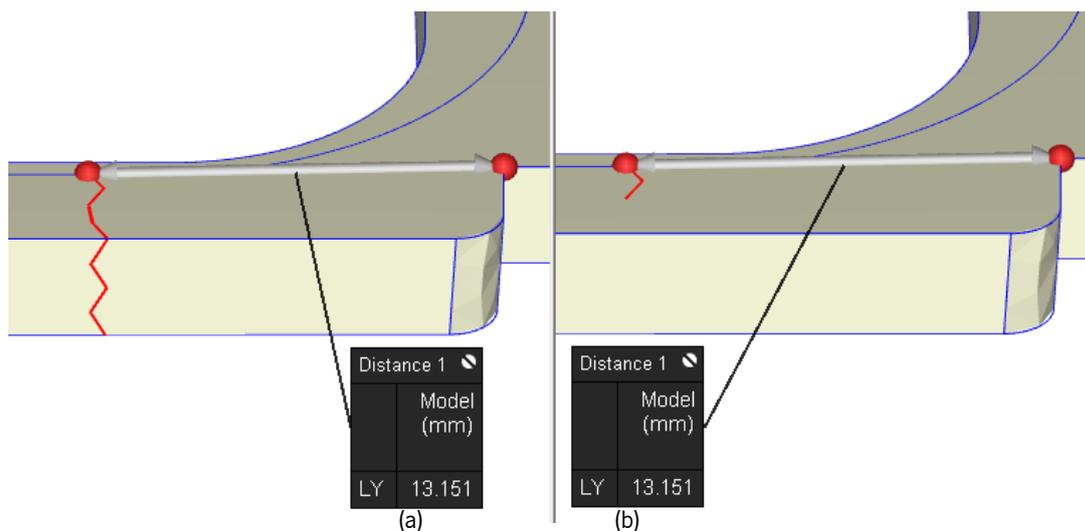


Figura 63. Comparação de linhas de soldadura: (a) *run* base; (b) *run* 7

As condições referentes à *run* 8 promoveram uma diminuição da largura de 46,1% ($\approx 23,57\mu\text{m}$) e um aumento da profundidade de 47,6% ($\approx 1,33\mu\text{m}$), relativamente à condição base. No entanto, apresenta semelhanças de cálculo comparativamente à *run* 7, todavia, em termos geométricas, mantém uma continuidade de diminuição da largura e um aumento elevado da profundidade. Em termos de cálculo numérico, na presente *run*, o *software* promoveu um cálculo incompleto da linha de soldadura, bem como um valor máximo de ângulo equivalente ao calculado na *run* 7. A única diferença entre as referidas *run*'s, ocorre no ângulo mínimo definido para a *run* 8. Tendo em conta esta variância, e tendo

como análise apenas os ângulos e a definição geométrica do entalhe, é de difícil compreensão entender qual das *run's* conduz a linhas de piores propriedades estéticas. Realça-se assim novamente, a necessidade de compreender qual dos fatores geométricos tende a afetar de forma significativa a estética do produto.

Por outro lado, tendo em conta uma análise global, como apresentado nas Figuras 64 e 65, é possível verificar uma tendência de resultados até à *run 5*, onde com um decréscimo de ângulos, ocorre um aumento sucessivo da largura das linhas. A *run 6* apesar de uma ligeira melhoria, quando comparado com a anterior, apresenta, de igual modo, uma largura e profundidade superior à condição base. No entanto, a *run 7*, apresenta resultados demasiado otimistas, tendo exclusivamente como análise, os ângulos definidos pelo Moldex3D®. Isto é, com base nos ângulos calculados, a referida *run* deveria apresentar uma dimensão de entalhe superior aos da condição base, contudo, não é o verificado. Esta variância de valores, ocorre provavelmente, devido ao cálculo incompleto das linhas de soldadura.

Deste modo, a partir de uma análise primária, a conclusão mais assertiva, tendo em conta os dados apresentados, ocorre quando a não representação da linha de soldadura por parte do *software*, visto confirmarem-se como sendo as linhas com piores propriedades geométricas.

No entanto, tendo em conta unicamente as condições de processo estabelecidas para as várias *run's*, os resultados apresentados estão conforme a tendência descrita no Capítulo 2, como será abordado no capítulo seguinte.

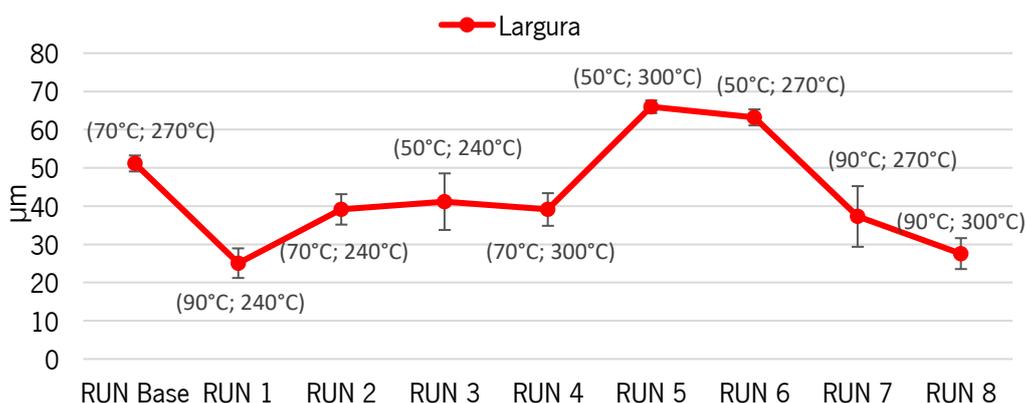


Figura 64. Evolução global da largura e profundidade das linhas de soldadura

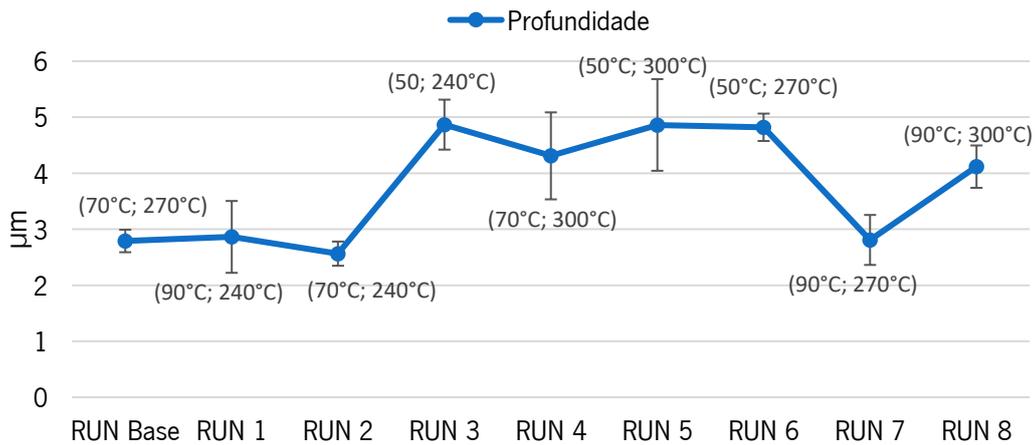


Figura 65. Evolução global da profundidade das linhas de soldadura

5.2.3. Influência das variáveis de processo nas linhas de soldadura

Como verificado anteriormente e, ilustrado na Figura 66, a geometria das linhas de soldadura apresentam dependência da temperatura. Estes dados ilustrados, foram elaborados com auxílio do *software Minitab*, com o objetivo de estudar a interação entre os fatores de processo e a respetiva resposta da profundidade e largura.

Na Figura 66 analisa-se a interação das condições de processo na largura da linha de soldadura, sendo a reta, com o valor de 51,14µm, o valor de referência, obtido na peça com as condições de processo utilizadas atualmente no fabrico.

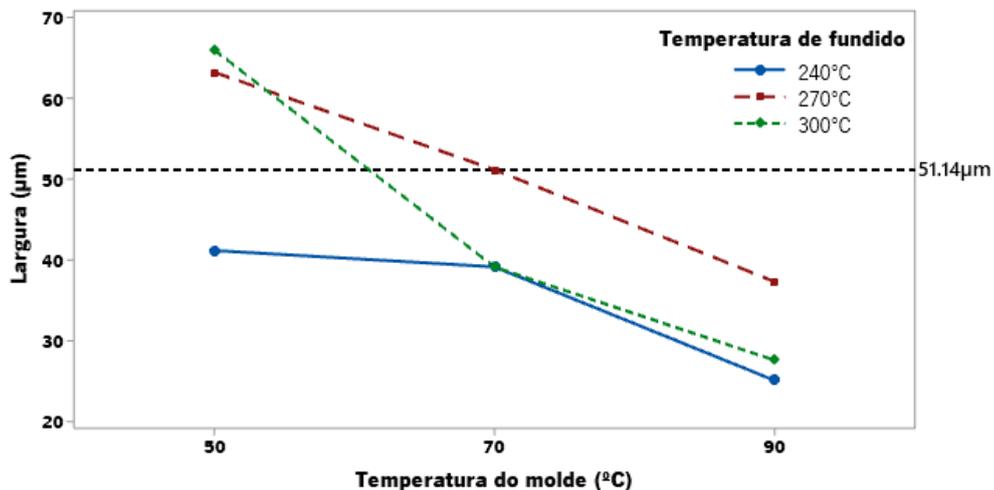


Figura 66. Efeito da interação da temperatura do molde e de fundido na largura da linha de soldadura

Tendo por base o gráfico da Figura 66, e como auxílio o gráfico da Figura 67, referente ao comportamento médio da largura, é possível aferir, desde logo, um comportamento não linear da variação da largura, tendo em conta o aumento da temperatura de fundido. Na passagem da temperatura

de 240°C para 270°C, manifesta-se um aumento da largura da linha de soldadura, sendo que, com o contínuo aumento da temperatura, a largura tende a diminuir. No entanto, apesar da dificuldade de interpretação teórica dos resultados, o comportamento medido e ilustrado graficamente na Figura 67, está em concordância com o estudo indicado no Capítulo 2 (Figura 23; [27]). Relativamente ao efeito da temperatura do molde, constata-se uma real tendência do comportamento, visto que, com o sucessivo aumento da temperatura, a largura apresenta um comportamento diminutivo constante.

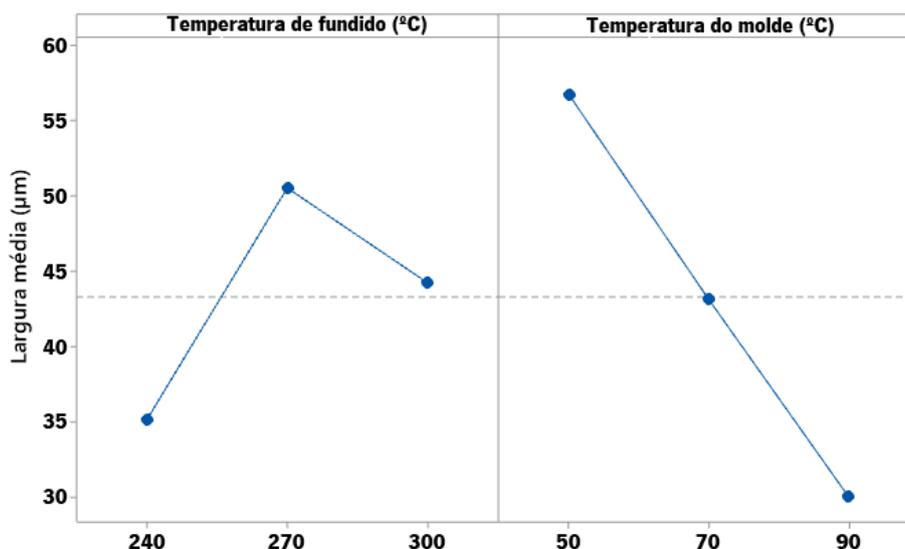


Figura 67. Efeitos médios da largura da linha de soldadura

Tendo em conta a variabilidade de resultados da temperatura de fundido, é fundamental compreender qual dos efeitos é mais preponderante sobre a resposta. Deste modo, de acordo com os resultados estatísticos da análise *Taguchi* do *Minitab*®, representados na Tabela 11, afere-se que, o fator com maior influência sobre a largura, é a temperatura do molde.

Tabela 11. Resposta médias para a linha de soldadura

Nível	Temperatura de fundido	Temperatura do molde
1	19.27	30.81
2	27.01	23.17
3	24.32	16.62
Delta	7.73	14.19
Posto	2	1

Na Figura 68 analisa-se a interação dos efeitos das temperaturas sob a profundidade do entalhe em V, sendo a reta, com valor de 2,79µm, o valor de referência medido na peça com as condições de processo atuais. De um ponto de vista geral, as condições de processo base desenvolvem uma

profundidade relativamente reduzida, visto que, a diferença para a profundidade mínima alcançada é somente $0,23\mu\text{m}$. No entanto, manifesta-se uma tendência de resultados, quando analisado em conjunto os gráficos relativos às Figuras 68 e 69. O sucessivo aumento da temperatura de fundido promove o crescimento da profundidade do entalhe, sendo o contrário verificado, com o aumento da temperatura do molde. Além disso, tendo em conta a Tabela 11, a temperatura do molde é o fator com maior efeito tanto na largura como na profundidade.

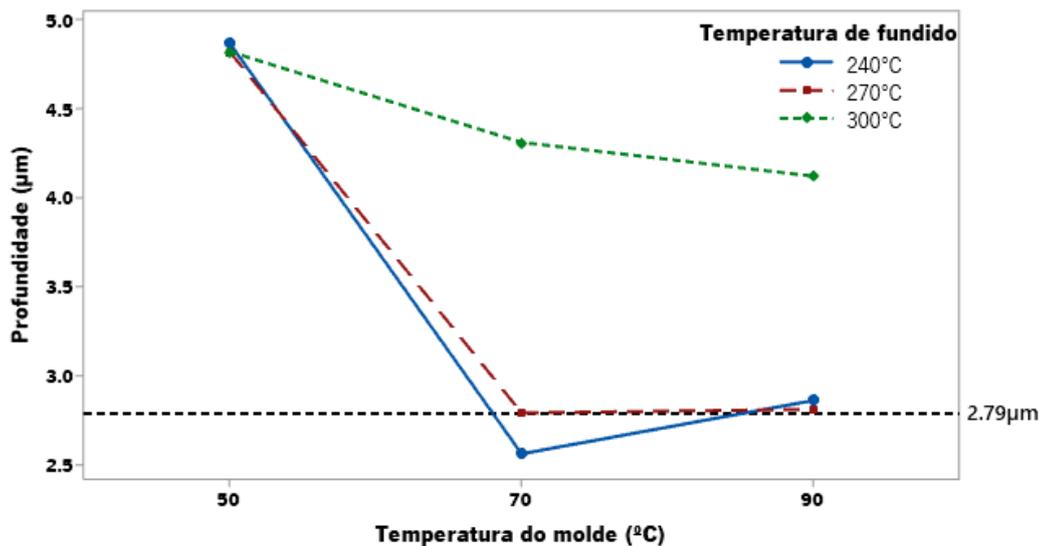


Figura 68. Efeito da interação da temperatura do molde e de fundido na profundidade da linha de soldadura

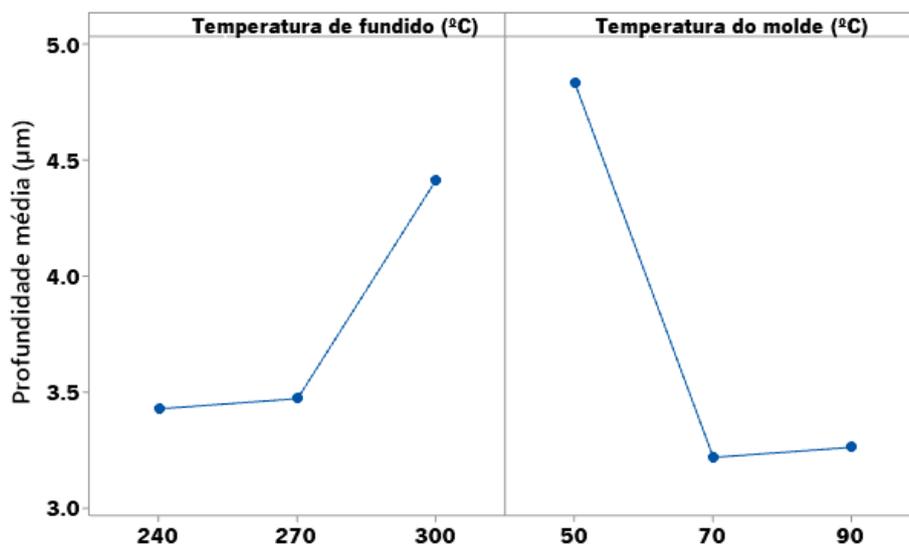


Figura 69. Efeitos médios da profundidade da linha de soldadura

Este sub-capítulo tem como finalidade estudar o impacto das condições de processo nas linhas de soldadura. Em primeiro lugar, a temperatura do molde revelou ser o fator mais impactante sobre a

geometria do entalhe, visto que, com o sucessivo aumento desta, a largura e profundidade têm tendência a diminuir. Relativamente à temperatura de fundido, não se analisou uma tendência de resultados, no entanto, aferiu-se que temperaturas mínimas resultam em geometrias de entalhe igualmente mínimas.

Assim sendo, tendo em conta os resultados obtidos, confere-se que temperaturas de fundido baixas em conjunto com temperaturas de molde elevadas, conduzem a linhas de soldadura com melhores propriedades estéticas, condições referentes à *run* 1 (Tabela 9). No entanto, tendo em conta a variabilidade de profundidade e largura das linhas, é prudente analisar o impacto da geometria sobre o processo de pintura. Este estudo terá como objetivo conciliar tais resultados com a geometria das linhas de soldadura e, por fim, com os resultados de ângulos obtidos pelo Moldex3D®.

5.2.4. Avaliação do impacto da pintura na visibilidade das linhas de soldadura

Com a finalidade de verificar quais os fatores geométricos (largura e/ou profundidade) que condicionam a visibilidade da linha, submeteram-se as peças ao processo de pintura com tinta preta de alto brilho (*CYCON-UV-HighGloss 757-10*). Após este processo, as peças são sujeitas a uma inspeção visual com o auxílio do Departamento de Qualidade, que classifica as linhas como não visíveis (OK) e visíveis (NOK), como apresentado na Tabela 12 e visível na Figura 70.

Tabela 12. Análise das linhas de soldadura após o processo de pintura

RUN	Profundidade (µm)	Largura (µm)	Ângulos (Moldex3D®)	Visibilidade da linha
Base	2,79 ± 0,20	51,14 ± 2,09	70° - 18°	NOK
RUN 1	2,86 ± 0,64	25,07 ± 3,87	120° - 22°	OK
RUN 2	2,56 ± 0,22	39,13 ± 3,98	115° - 24°	NOK
RUN 3	4,87 ± 0,45	41,15 ± 7,40	93° - 23°	NOK
RUN 4	4,31 ± 0,78	39,11 ± 4,27	87° - 20°	NOK
RUN 5	4,86 ± 0,82	65,98 ± 1,65	não ilustrada	NOK
RUN 6	4,82 ± 0,24	63,20 ± 2,09	não ilustrada	NOK
RUN 7	2,81 ± 0,45	37,28 ± 7,94	52° - 22°	NOK
RUN 8	4,12 ± 0,38	27,57 ± 4,04	53° - 5°	NOK

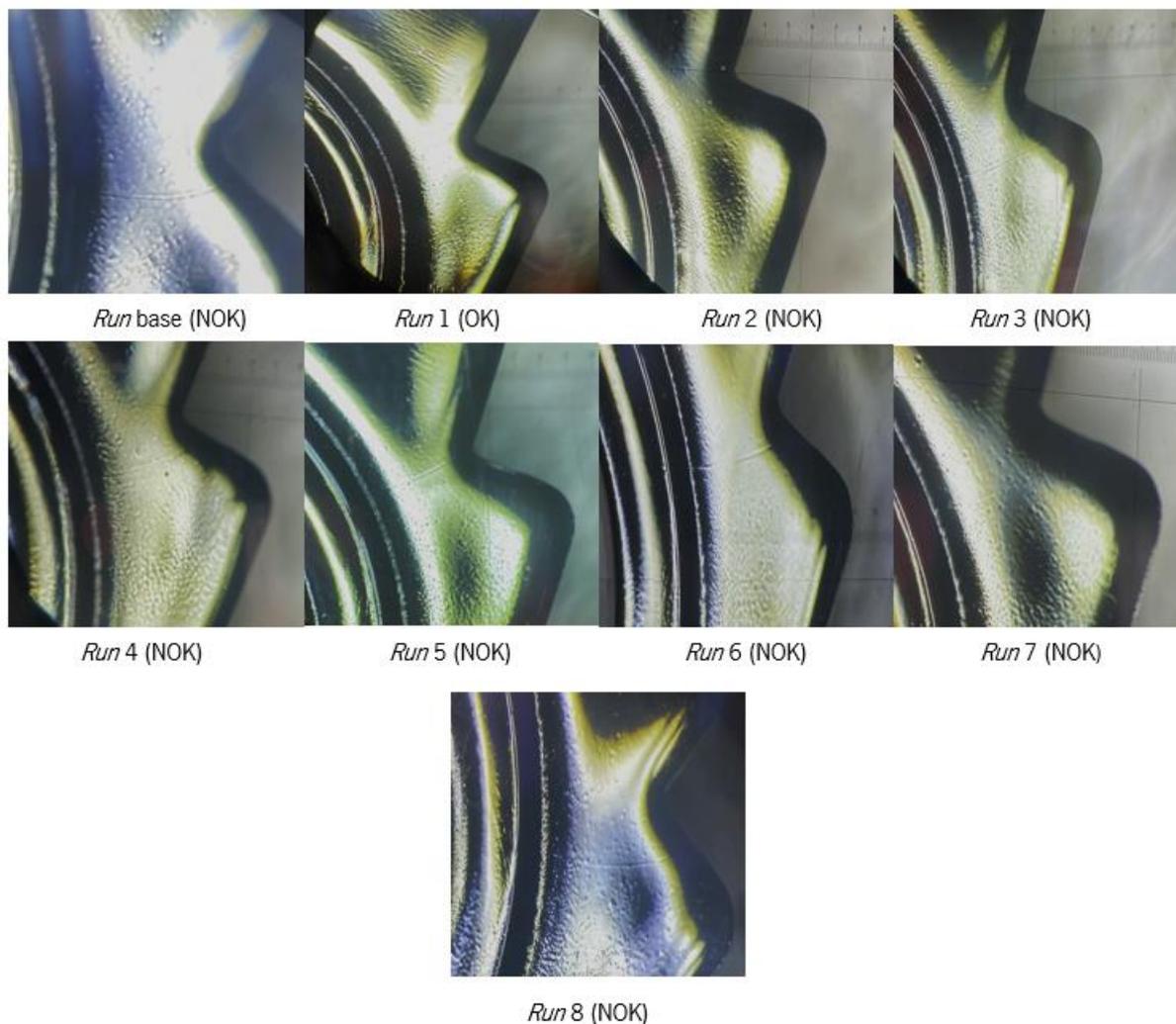


Figura 70. Análise das linhas de soldadura com auxílio de uma lente de ampliação

A linha de soldadura em observação, é referente à zona final de enchimento, estando localizada na zona B da peça, isto é, numa zona não visível pelo utilizador final. Deste modo, apesar das condições de processo da *run* base cumprirem os critérios para o cliente, neste estudo em específico, a peça foi classificada como não conforme.

As *run*'s 5 e 6 são caracterizadas por originarem uma linha de soldadura com máxima profundidade e largura, resultando, conseqüentemente, na visibilidade da linha. Classificam-se, deste modo, como as piores linhas de soldadura, tendo em vista, a geometria do entalhe, os ângulos e a visibilidade após pintura. Comparando com as *run*'s 3 e 4, as condições proporcionaram uma diminuição da largura, permanecendo, a profundidade constante. Posto isto, e, tendo em conta os resultados, apura-se que a profundidade, de forma independente, afeta do mesmo modo a visibilidade da linha. Tal comportamento é validado com a análise adicional da *run* 8, isto porque, apesar de apresentar uma

largura próxima do mínimo, a profundidade elevada promoveu à continuidade da visibilidade da linha, permitindo concluir o impacto da profundidade sobre o comportamento final.

Para as *run's* 2 e 7, a percepção visual torna-se mais difícil, sendo necessário recorrer a uma lente de ampliação. Através da mesma, é possível verificar que a linha continua visível, devido à sua largura, dado que a *run 2* apresenta o valor mínimo de profundidade. Assim sendo, pode afirmar-se que a largura, de forma independente, influencia igualmente a visibilidade.

Portanto, tendo em conta as medições efetuadas e a análise após o processo de pintura, verifica-se que tanto a largura como a profundidade, em conjunto ou individualmente, resultam na visibilidade da linha de soldadura. Para efeito contrário, e, obter linhas de soldadura com máxima qualidade é fundamental impor condições de processamento que promovam entalhes em V mínimos. Como dado na *run 1*, temperaturas de fundido mínimas e temperaturas de molde máximas, promoveram entalhes mínimos, garantindo-se, conseqüentemente, a estética do produto a nível de linha de soldadura. A esta *run* encontra-se ainda associado uma variação de ângulos de 120°-22° (dados fornecidos pelo *software*).

5.3. Técnica de Avaliação dos Chupados

Com o objetivo de determinar a profundidade e/ou área relativa aos chupados, encontram-se definidas várias metodologias de cálculo na bibliografia.

Inicialmente, o objetivo era aplicar o mesmo equipamento de medição, anteriormente definido, porém, devido à restrição de área apresentada pelo equipamento, é impossível incluir o chupado na sua totalidade. Deste modo, devido à limitação apresentada, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com a finalidade de definir uma outra metodologia de medição. De acordo com a pesquisa, metodologias como CMM (Máquina de Medição por Coordenadas) [91][92], paquímetro de pontos [33], 3D laser scanner [93] e relógio comparador [94] são possíveis formas de medição. No entanto, devido a limitações de equipamentos por parte da universidade e empresa, apenas é possível prosseguir e avaliar a fiabilidade das medições com o paquímetro de pontos e com o relógio comparador.

Iniciou-se com a utilização de paquímetro de pontos, contudo, devido às complexidades geométricas, bem como limitações do equipamento, os resultados obtidos não apresentavam uma tendência entre peças do mesmo grupo de condições, bem como não era assegurado uma medição idêntica de peça para peça. O mesmo problema verificou-se na aplicação do relógio comparador, onde a elevada variabilidade e a não tendência de resultados conduziram à refutação da metodologia.

Posto isto, a solução passa por uma análise qualitativa dos chupados, definindo-se a seguinte metodologia a adotar:

1. Pintura das peças com tinta de alto brilho;
2. Avaliação das peças com auxílio de cinco colaboradores treinados, classificando-as como conformes (OK) e não conformes (NOK)
3. Análise da classificação e comparação com os resultados obtidos no Moldex3D®.

Com a metodologia definida, pretende-se estabelecer uma métrica tendo em conta apenas uma análise qualitativa e os dados relativos à profundidade do chupado, calculados pelo Moldex3D®. No entanto, de modo a elaborar um estudo mais completo e preciso, é fundamental implementar uma análise quantitativa da área e profundidade do respetivo chupado.

5.3.1. Análise de resultados – Chupados

Tendo em conta a classificação atribuída pelos colaboradores, construiu-se a Tabela 13. Nesta tabela, constam os valores relativos à profundidade dos chupados na superfície A da peça, calculados pelo Moldex3D®, bem como o somatório percentual da classificação dada. A avaliação foi realizada com o auxílio de cinco colaboradores da linha de inspeção da pintura, com formação na deteção de defeitos das peças.

Tabela 13. Análise de chupados após o processo de pintura

RUN	Chupados: Superfície A (mm)	Classificação (%)	
		OK	NOK
Base	0,006	100	0
1	0	100	0
2	0	100	0
3	0,004	100	0
4	0,027	0	100
5	0,023	0	100
6	0,010	100	0
7	0,014	0	100
8	0,011	20	80
9	0,009	80	20
10	0,008	0	100

A partir da análise da referida tabela, afere-se que, chupados com profundidades inferiores a 0,010mm (*run* base, 1, 2, 3, 6 e 9), estão de acordo com os vários requisitos de inspeção, obtendo-se assim, uma classificação de 100%. Pelo contrário, destaca-se de forma negativa a *run* 10, que, de acordo com os dados do *software*, possui um chupado com 0,008mm, tendo sido, no entanto, avaliada como não conforme. Esta avaliação, advém da formação de rebarbas, devido a elevadas temperaturas de fundido e de molde, 300°C e 90°C, respetivamente. Para além do referido defeito, visto que não houve alterações no tempo de arrefecimento, a peça não adquiriu uma solidificação suficiente de modo a suportar a força dos extratores, originando assim marcas de extração da superfície. Assim sendo, estes defeitos conduziram à não conformidade da peça.

Observado as *run's* 4, 5, 7 e 8 e a sua respetiva classificação, é possível averiguar que, chupados com profundidades superiores a 0,011mm tornaram-se visíveis, resultando assim, na não conformidade da peça. Efetuando a comparação entre as *run's* 4 e 5, confere-se que os chupados evidenciam elevada dependência da fase de compactação. A *run* 4 apresenta temperaturas de fundido e de molde máximas,

ao contrário da *run* 5 que é definida com o mínimo das temperaturas, no entanto, ambas apresentam os chupados de maior profundidade. O mesmo sucede com a *run* base e 8, visto que, com a redução do tempo de compactação, ocorrido na *run* 8, a profundidade do chupado aumenta, transitando de conforme para não conforme. Estes comportamentos referidos vão de encontro com os estudos mencionados no estado de arte (Capítulo 2, Figura 29 e 30).

Nas *run's* 8 e 9 observa-se uma certa divergência da classificação dada à inspeção, devido à aprovação total dada na *run* 6. Entre as devidas *run's*, a variação da profundidade dos chupados é de $\pm 0,001$ mm, e, como tal, por se tratarem de condições próximas do limiar de visibilidade, poderão incorrer variações das respostas dadas pelos colaboradores.

Portanto, tendo em conta o método de análise efetuado e a sua respetiva classificação, conclui-se que, chupados com profundidades inferiores a 0,010mm, são impercetíveis após o processo de pintura. É também importante salientar que a métrica definida é referente a um valor dado pelo *software*, não sendo assim, indicativo da profundidade real do chupado.

Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos futuros

A moldação por injeção é, atualmente, uma das técnicas com maior relevância na indústria de produção de plásticos, com inúmeras aplicações. No entanto, um dos principais desafios presentes encontra-se relacionado com os elevados padrões de exigência requeridos por parte dos clientes. Consequentemente, são desafiadas as capacidades técnicas e produtivas, a fim de alcançar maior nível de eficiência de recursos, qualidade de produto e redução de custos associados. A estes fatores, encontram-se ainda aplicados os desafios de sustentabilidade, diretamente relacionados com a eficiência produtiva, isto é, diminuição de refugo e consumo energético, desenvolvimento eficaz do produto e da ferramenta produtiva, automatização, robotização, entre outros.

De modo a intervir sobre o refugo, no desenvolvimento de produto e ferramenta, bem como na fase de produção, encontra-se em mercado, vários *softwares* de modelação numérica, com capacidades de simulação do processo de injeção, de modo a apoiar os vários processos. Estes apresentam capacidade de antecipação de falhas e defeitos na produção, porém, de modo que os dados sejam eficazes na previsão de defeitos, é necessário estabelecer métricas que definam indicadores de qualidade. Define-se, portanto, o principal objetivo do trabalho, a definição de métricas para a previsão de defeitos.

As linhas de soldadura e os chupados foram os defeitos estéticos abordados ao longo do trabalho, com o intuito de definir indicadores que garantam a reprodutibilidade e eficiência das moldações, durante as três fases principais: desenvolvimento, industrialização e produção. O Moldex3D®, *software* CAE, aplicado para o estudo, caracteriza as linhas de soldadura pelos sucessivos ângulos durante a união das frentes de fluxo. Relativamente aos chupados, estes são definidos pelo valor relativo ao deslocamento superficial ocorrido. Assim, inicialmente, construíram-se DOE's para os referidos defeitos, com o intuito de promover condições de processo que tendam a realçar e minimizar a visibilidade do defeito. Obtêm-se, como resultado dos DOE's, diferentes condições de processo que, consequentemente, apresentam variados ângulos relativos às linhas de soldadura, bem como diferentes valores de profundidade para os chupados.

Tendo em conta os resultados dos DOE's para as linhas de soldadura, destacam-se divergências nas representações e cálculo das mesmas por parte do *software*. Como exemplo disso, registaram-se casos de não representação da linha de soldadura, apesar de estar em estudo a zona final de enchimento.

Estes fatores induzem possíveis imprecisões ou variações na fase de cálculo numérico. Porém, com a análise morfológica tornou-se possível verificar a viabilidade dos resultados e, assim, comparar e relacionar o efeito de ângulos, calculados pelo Moldex3D®, com a geometria do entalhe em V. A medição do entalhe foi dada com auxílio de um equipamento de medição ótico 3D (*Alicona Infinite Focus SL*), obtendo-se dados relativos à largura e profundidade do referido entalhe.

Após medição e tratamento de dados, efetua-se a comparação entre os ângulos e a geometria do entalhe, concluindo-se, preliminarmente que, aquando da não representação da linha por parte do *software*, obtêm-se as piores linhas de soldadura, devido à elevada dimensão da geometria do entalhe. Para além disso, verifica-se ainda uma tendência de resultados entre o aumento de ângulos e a sucessiva diminuição do entalhe, contudo, um caso em específico saiu da tendência prevista. A *run 7* é caracterizada por três fatores, isto é, primeiro apresenta um ângulo máximo de 52°C, inferior à condição base. Segundo, o *software* efetuou um cálculo incompleto da linha de soldadura, sendo os ângulos referentes a uma parte da linha de soldadura e não da sua totalidade. Por último, as condições de processo aplicadas proporcionam um entalhe em V de menor largura e de profundidade aproximadamente equivalente à condição de referência. Deste modo, relacionando os três fatores, destaca-se uma discordância entre o resultado de ângulos e das medições efetuadas, no entanto, esta divergência de resultados advém provavelmente do cálculo incompleto da linha de soldadura.

No entanto, a geometria do entalhe não se comporta de forma igual, isto é, uma menor largura não corresponde sempre a uma menor profundidade. Assim sendo, é importante verificar quais os fatores geométricos (largura e/ou profundidade) tendem a condicionar a visibilidade da linha, após o processo de pintura. Após processo de revestimento, as peças foram inspecionadas, classificando-se como OK/NOK. Foi possível concluir que tanto a largura como a profundidade, em conjunto ou individualmente, condicionam a continuidade da visibilidade da linha após pintura. Todavia, resultou apenas uma peça conforme (*run 1*), caracterizada metricamente por apresentar uma largura e profundidade de 25,07µm e 2,86µm, respetivamente, bem como um ângulo máximo de 120°.

Um outro estudo relacionado com as linhas de soldadura, deu-se com o intuito de analisar a interação das condições de processo na geometria da linha de soldadura. Aferiu-se que o fator de processo com maior influência sobre as linhas é a temperatura do molde, visto que, com o sucessivo aumento desta, tanto a largura como a profundidade tendem a diminuir.

Abordando os chupados, efetuou-se, de igual forma, o mesmo procedimento descrito para o caso das linhas de soldadura, isto é, construção de DOE's, obtendo-se variados conjuntos de condições de processo, com diferentes valores relativos à profundidade do defeito. Os chupados não possuem uma

solução única, como verificado na bibliografia, visto estarem dependentes de inúmeros fatores associados. No entanto, a pressão de compactação é dada como o fator de maior influência sobre a perceptibilidade do defeito, seguida do tempo de compactação.

O objetivo inicial, tal como realizado nas linhas de soldadura, passava por uma análise métrica da profundidade e área relativa dos chupados, porém, devido a limitações de equipamentos, a solução passou por efetuar uma análise qualitativa do defeito, atribuindo uma classificação de OK/NOK. Do estudo, resultou que, chupados com profundidades inferiores a 0,010mm, são imperceptíveis após o processo de pintura. Todavia, é necessário ter em atenção ao possível desenvolvimento de defeitos adicionais, como o caso ocorrido na *run* 10. Na *run* em questão, os chupados apresentavam uma profundidade máxima de 0,008mm, inferior ao valor máximo definido, porém, devido às elevadas temperaturas impostas, originou-se rebarbas, defeito não previsto pelo Moldex3D®. Um outro fator a salientar deve-se ao facto de que a métrica definida é referente a um valor dado pelo *software*, não sendo assim, indicativo da profundidade real do chupado.

De uma forma geral, o trabalho realizado foi de encontro aos objetivos definidos inicialmente, destacando-se as seguintes métricas:

- **Linhas de soldadura** com ângulos superiores a **120°**, inclusive;
- **Chupados** com profundidade inferior a **0,010mm**, inclusive.

Para além disso, assimilando as condições de processo ideias para cada tipo de defeito, a condição otimizada, que promove a melhores propriedades estéticas, traduz-se num aumento da temperatura do molde para 90°C e uma redução da temperatura de fundido para 240°C. No entanto, a referida condição adiciona quatro segundos ao tempo de ciclo, sendo que, de modo a não aumentar o tempo de ciclo é possível implementar uma outra condição (Temperatura de fundido = 240°C e Temperatura do molde = 70°C).

O conjunto de informações obtidas a partir do estudo realizado na dissertação apresentam um impacto direto e imediato em todos os processos produtivos da empresa, porém, é fundamental, em perspetiva de trabalho futuro, fortalecer as métricas definidas. Para isso, é essencial realizar o processo descrito em outras peças, a fim de validar as métricas propostas. Além disso, a metodologia definida para o caso dos chupados deve incorporar um método de avaliação quantitativa, isto é, efetuar medições da peça em termos de profundidade e de área do chupado, para resultados mais concisos.

Referências Bibliográficas

- [1] “Fehst Componentes, Lda.” <https://www.fehstgroup.com/pt/> (accessed Jan. 25, 2023).
- [2] A. Matos *et al.*, *Moldação por Injeção e Materiais Plásticos*, em ‘Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plástico’, Centimfe, Guimarães, 2003. ISBN 972-98872-1-7”.
- [3] M. R. (Musa R. Kamal, A. I. Isayev, and S.-J. Liu, *Injection molding : technology and fundamentals*. Hanser, 2009.
- [4] D. Mathivanan, M. Nouby, and R. Vidhya, “Minimization of sink mark defects in injection molding process-Taguchi approach,” 2010. [Online]. Available: www.ijest-ng.com
- [5] Goodship and Vanessa, “Practical Guide to Injection Moulding Edited by Vanessa Goodship.” [Online]. Available: <http://www.rapra.net>
- [6] J. Shoemaker, “Moldflow Design Guide A Resource for Plastics Engineers First Edition,” 2006. [Online]. Available: www.moldflow.com
- [7] Vanessa Goodship, Bethany Middleton, and Ruth Cherrington, *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*.
- [8] All Plastics, “Scientific Injection Molding Benefits.” <https://www.all-plastics.com/scientific-molding-ensures-zero-defects/> (accessed Nov. 10, 2022).
- [9] Júlio C. Viana, “Ciclo de moldação- Pressão na Cavidade.”
- [10] ECOMOLDING, “Plastic Injection Molding Process.” <https://www.injectionmould.org/injection-molding-plastic-process/> (accessed Nov. 10, 2022).
- [11] Huamin. Zhou, *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Wiley, 2013.
- [12] N. Phan-Thien and N. Mai-Duy, “Understanding Viscoelasticity.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8431>
- [13] T. A. Osswald and N. S. Rudolph, *Polymer rheology : fundamentals and applications*.
- [14] Júlio C. Viana, “Principais fenómenos físicos.”
- [15] J. C. Viana, N. Billon, and A. M. Cunha, “The thermomechanical environment and the mechanical properties of injection moldings,” *Polym Eng Sci*, vol. 44, no. 8, pp. 1522–1533, 2004, doi: 10.1002/pen.20149.

-
- [16] Filipe André Oliveira Silva, "Otimização do processo de injeção de peças poliméricas para automóveis utilizando o método de elementos finitos," 2017.
- [17] H. Zhou and L. I. Dequn, "Computer evaluation of weld lines in injection-molded parts," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 24, no. 3, pp. 315–322, 2005, doi: 10.1177/0731684405043558.
- [18] C. Y. Wu, C. C. Ku, and H. Y. Pai, "Injection molding optimization with weld line design constraint using distributed multi-population genetic algorithm," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 1–4, pp. 131–141, Jan. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2719-y.
- [19] K. Tomari, S. Tonogai, T. Harada, H. Hamada, K. Lee, and T. Morii, "The V-Notch at Weld Lines in Polystyrene Injection Moldings."
- [20] G. Tosello, A. Gava, H. N. Hansen, G. Lucchetta, and F. Marinello, "Characterization and analysis of weld lines on micro-injection moulded parts using atomic force microscopy (AFM)," *Wear*, vol. 266, no. 5–6, pp. 534–538, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.wear.2008.04.077.
- [21] S. Y. Hobbs, "Some Observations on the Morphology and Fracture Characteristics of Knit lines."
- [22] S.-G. Kim and N. P. Suh, "Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers."
- [23] T. Nguyen-Chung, "Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics," *Rheol Acta*, vol. 43, no. 3, pp. 240–245, May 2004, doi: 10.1007/s00397-003-0339-2.
- [24] G. Tosello, H. N. Hansen, and G. Lucchetta, "Influence of process parameters on the weld lines of a micro injection molded component HiMicro View project EU H2020 PROSURF 'High Precision Process Chains for the Mass Production of Functional Structured Surfaces' View project," 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/260289233>
- [25] C. A. Deutschland, "Understanding and Optimizing Weld Lines in Thermoplastic Molding," 2016. [Online]. Available: www.plastics.covestro.com
- [26] R. Selden, "Effect of Processing on Weld Line Strength in Five Thermoplastics."
- [27] C. H. Wu and W. J. Liang, "Effects of geometry and injection-molding parameters on weld-line strength," *Polym Eng Sci*, vol. 45, no. 7, pp. 1021–1030, Jul. 2005, doi: 10.1002/pen.20369.
- [28] A. Kaufmann, "Geometrical modification of weld lines for high performance plastics in injection molding Chair of Polymer Processing Department of Polymer Engineering and Science Montanuniversitaet Leoben in cooperation with Hoerbiger," 2013.

-
- [29] S. C. Malguarnera, A. I. Manisali, and D. C. Riggs, "Weld Line Structures and Properties in Injection Molded Polypropylene."
- [30] Y. Murata and R. Kanno, "Effects of Heating and Cooling of Injection Mold Cavity Surface and Melt Flow Control on Properties of Carbon Fiber Reinforced Semi-Aromatic Polyamide Molded Products Effects of Heating and Cooling of Injection Mold Cavity Surface and Melt Flow Control on Properties of Carbon Fiber Reinforced Semi-Aromatic Polyamide Molded," 2021, doi: 10.3390/polym.
- [31] S. C. H. Malguarnera and A. Manisali, "The Effects of Processing Parameters on the Tensile Properties of Weld Lines in Injection Molded Thermoplastics."
- [32] R. K. Indd, "Injection-Molding Problems in Engineering Thermoplastics Causes and Solutions," 2009.
- [33] B. Singh Solanki, T. Sheorey, and H. Singh, "Experimental and numerical investigation of shrinkage and sink marks on injection molded polymer gears: a case study," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 16, no. 4, pp. 1653–1667, Dec. 2022, doi: 10.1007/s12008-022-00892-3.
- [34] K. F. Hayden, "Determining the Probability of the Visual Detection of Sink Marks Determining the Probability of the Visual Detection of Sink Marks on Differently Textured Injection Molded Products on Differently Textured Injection Molded Products," 2006. [Online]. Available: <https://scholarworks.wmich.edu/dissertations/948>
- [35] Leoben, "Measurement of the visual perceptibility of sink marks in injection molded parts Chair of Polymer Processing, Montanuniversitaet Leoben," 2011.
- [36] D. Mathivanan and N. S. Parthasarathy, "Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 7–8, pp. 654–663, Aug. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1749-1.
- [37] M. Swan, "History of Injection Molding Simulation-the state of the technology after its first quarter century," 2003.
- [38] S. W. Kim and L. S. Turng, "Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection moulding," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 12, no. 3. May 2004. doi: 10.1088/0965-0393/12/3/S07.
- [39] R. L. B. and L. Cooper. H.L. Toor, "Predicting mold flow by electronic computer., *Modern Plastics*, December, 1960."
- [40] I.T. Barrie, " Understanding how an injection mold fills," *SPE Journal*, 27:64–69, 1971.

-
- [41] M. R. Kamal and S. Kenig, "The Injection Molding of Thermoplastics Part II: Experimental Test of the Model."
- [42] G. Williams and H. A. Lord, "Mold-filling studies for the injection molding of thermoplastic materials. Part I: The flow of plastic materials in hot- and cold-walled circular channels," *Polym Eng Sci*, vol. 15, no. 8, pp. 553–568, 1975, doi: 10.1002/PEN.760150802.
- [43] "Moldflow | Plastic Injection & Compression Molding Software | Autodesk." <https://www.autodesk.com/products/moldflow/overview> (accessed Mar. 08, 2023).
- [44] C. Austin., "Filling of mold cavities. In E.C. Bernhardt, editor, Computer-Aided Engineering for Injection Molding, Hanser, New York, 1983."
- [45] M. Kamal., "The McGill University model (McKam-II):: A comprehensive, integrated computer simulation of the injection molding process. In L.T. Manzione, editor, Application of Computer-Aided Engineering in Injection Molding. Hanser, New York, 1987."
- [46] C. A. Hieber and S. F. Shen, "A FINITE~ELEMENT/FINITEDIFFERENCE SIMULATION OF THE INJECTION-MOLDING FILLING PROCESS," 1980.
- [47] N. Whitaker', "Numerical Solution of the Hele-Shaw Equations*," 1990.
- [48] H. Mavridis, A. N. Hrymak, and J. Vlachopoulos, "The Effect of Fountain Flow on Molecular Orientation in Injection Molding," *J Rheol (N Y N Y)*, vol. 32, no. 6, pp. 639–663, Aug. 1988, doi: 10.1122/1.549984.
- [49] H. Mavridis, A. N. Hrymak, and J. Vlachopoulos, "Finite Element Simulation of Fountain Flow in Injection Molding."
- [50] S. F. S. and K. K. Wang. T.H. Kwon, "Computer-aided cooling system design for injection molding. In Soc. Plast. Eng. Proc. Annual Tech. Conf. (ANTEC), volume 32, pages 110-115, 1986."
- [51] C. A. H. and K. K. Wang. K. Himasekhar, "Computer-aided design software for cooling system in injection molding. In Soc. Plast. Eng. Proc. Annual Tech. Conf. (ANTEC), volume 35, pages 352–355, 1989."
- [52] C. A. H. and D. L. C. A.I. Isayev, "Residual stresses in the injection molding of amorphous polymers. In Soc. Plast. Eng. Proc. Annual Tech. Conf.(ANTEC), volume 27, pág.110–113, 1981."
- [53] V. B. and M. R. Kamal. G. Titomanlio, "Mechanism of cooling stress build-up in injection molding of thermoplastic polymers. *Int. Polym. Process.*, 1:55–59, 1987."
- [54] H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part I: Formulation."

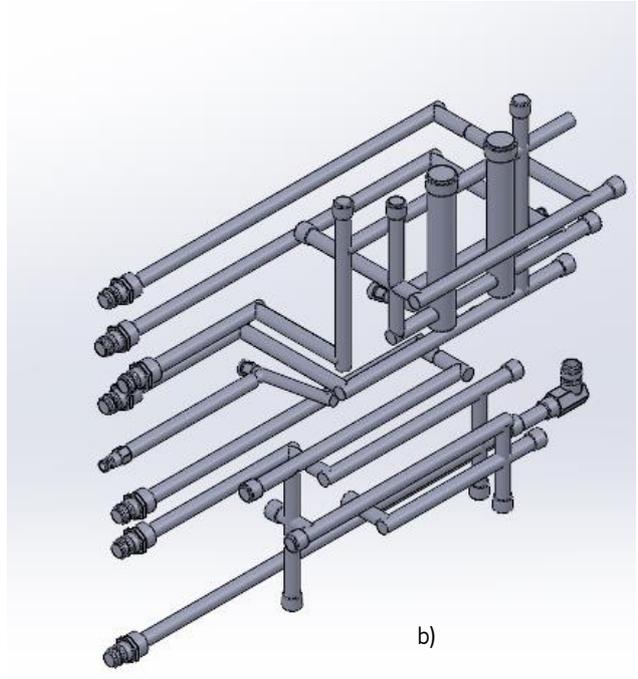
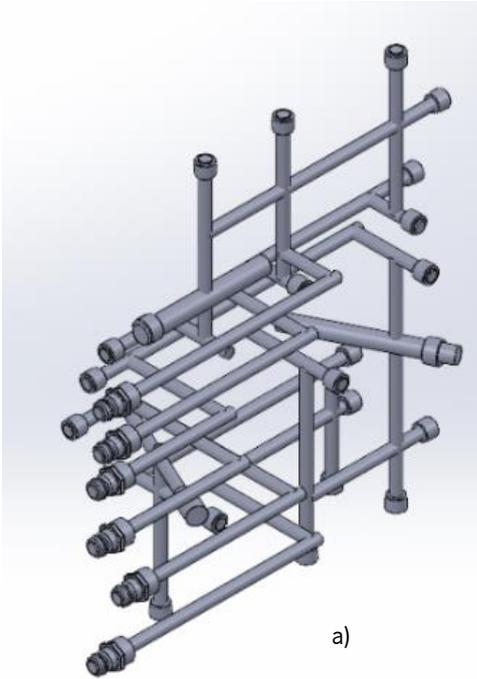
- [55] L.F. Douven., “Towards the Computation of Properties of Injection-Moulded Products: Flow and Thermally Induced Stresses in Amorphous Thermoplastics. PhD thesis, Technical University of Eindhoven, 1991.”
- [56] G. Titomanlio, V. Speranza, and V. Brucato, “On the Simulation of Thermoplastic Injection Moulding Process.” [Online]. Available: www.hanser-elibrary.com
- [57] Y. L. and A. G.-Rejon. J.-F. Héту, “Three-dimensional finite element simulation of mold filling processes. In S.F. Shen and P. Dawson, editors, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, Numiform 95, Rotterdam, 1995. Balkema.”
- [58] K. T. and C. Friedl. V. Rajupalem, “Three-dimensional simulation of the injection molding process. In Soc. Plast. Eng. Proc. Annual Tech. Conf. (ANTEC), volume 43, pages 670–673, 1997.”
- [59] F. S. C. V. R. L. A. and C. Friedl. K. Talwar, “Three-dimensional simulation of plastic injection molding. In Soc. Plast. Eng. Proc. Annual Tech. Conf. (ANTEC), volume 46, pages 563-566, 1998.”
- [60] P. Thyregod, “MODELLING AND MONITORING IN INJECTION MOLDING.”
- [61] R. Y. Chang and W. H. Yang, “Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach,” *Int J Numer Methods Fluids*, vol. 37, no. 2, pp. 125–148, Sep. 2001, doi: 10.1002/flid.166.
- [62] S. Bhavikatti, *Finite Element Analysis*. New Age International (P) Ltd., Publishers.
- [63] G. Eder, H. Janeschitz-Kriegl, and S. Liedauer, “CRYSTALLIZATION PROCESSES IN QUIESCENT AND MOVING POLYMER MELTS UNDER HEAT TRANSFER CONDITIONS,” 1990.
- [64] G. Eder and H. Janeschitz-Kriegl., *Crystallization*. In H.E.H. Meijer, editor, *Materials Science and Technology, Vol. 18, Processing of Polymers*, pages 269–342. Wiley-VCH, New York, 1997.
- [65] H. Zuidema., “Flow-Induced Crystallinity of Polymers, Applications to Injection Molding. PhD thesis, Technical University of Eindhoven, 2000.”
- [66] A. K. and J. Berger. W. Schneider, “Non-isothermal crystallization, crystallization in polymers. *Int. Polym. Process.*, 2:151–154, 1988.”
- [67] Moldex3D, “Plastic Injection Molding Simulation Software.” <https://www.moldex3d.com/products/software/moldex3d/> (accessed Apr. 26, 2023).
- [68] “Moldex3D | Mathematical Models and Assumptions.” https://support.moldex3d.com/2022/en/6-8-8-2_mathematicalmodelsandassumptions.html (accessed Mar. 17, 2023).

- [69] B. Bujanić, M. Šercer, and M. Rujnić-Sokele, “Comparison of Moldex3D and Moldflow Injection Moulding Simulations,” *Trends in the development of machinery and associated technology*. 2006.
- [70] M. J. Jaworski and Z. Yuan, “Theoretical and experimental comparison of the four major types of mesh currently used in cae injection molding simulation software,” in *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 2003.
- [71] Moldex3D, “Analysis Preparation in Moldex3D Project.” http://support.moldex3d.com/r16/en/analysissetup_prepareanalysis_analysispreparationinmoldex3dproject.html (accessed Jan. 30, 2023).
- [72] J. Pinho-Da-Cruz, R. A. Fontes Valente, and R. J. Alves De Sousa, “Método dos Elementos Finitos-Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia.”
- [73] R. W. Clough, “The Finite Element Method in Plane Stress Analysis, Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, pp. 345-378, Pittsburgh, Estados Unidos da America, 1960.”
- [74] R. Courant, “VARIATIONAL METHODS FOR THE SOLUTION OF PROBLEMS OF EQUILIBRIUM AND VIBRATIONS.”
- [75] M. J. TURNER, R. W. CLOUGH, H. C. MARTIN, and L. J. TOPP, “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 23, no. 9, pp. 805–823, Sep. 1956, doi: 10.2514/8.3664.
- [76] Singiresu S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, Fifth Edition. University of Miami, Coral Gables, Florida, USA, 2011.
- [77] Á. F. M. Azevedo, “MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS,” 2003. [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt/~alvaro>
- [78] O. C. , and C. Y. K. , Zienkiewicz, “Finite Elements in the Solution of Field Problems, The Engineer, pp. 507–510, Sept. 24, 1965.”
- [79] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition*. Thomson, 2007.
- [80] “Numerical Solutions Of Partial Differential Equations By The Finite Element Method (Claes Johnson) (z-lib.org)”.
- [81] “Fundamentals of Finite Element Analysis (David V. Hutton, David Hutton) (z-lib.org)”.
- [82] D. S. H. Io A S P O N B O O K, “Finite Element Mesh Generation.”
- [83] D. Madier, *Practical finite element analysis for mechanical engineers*.

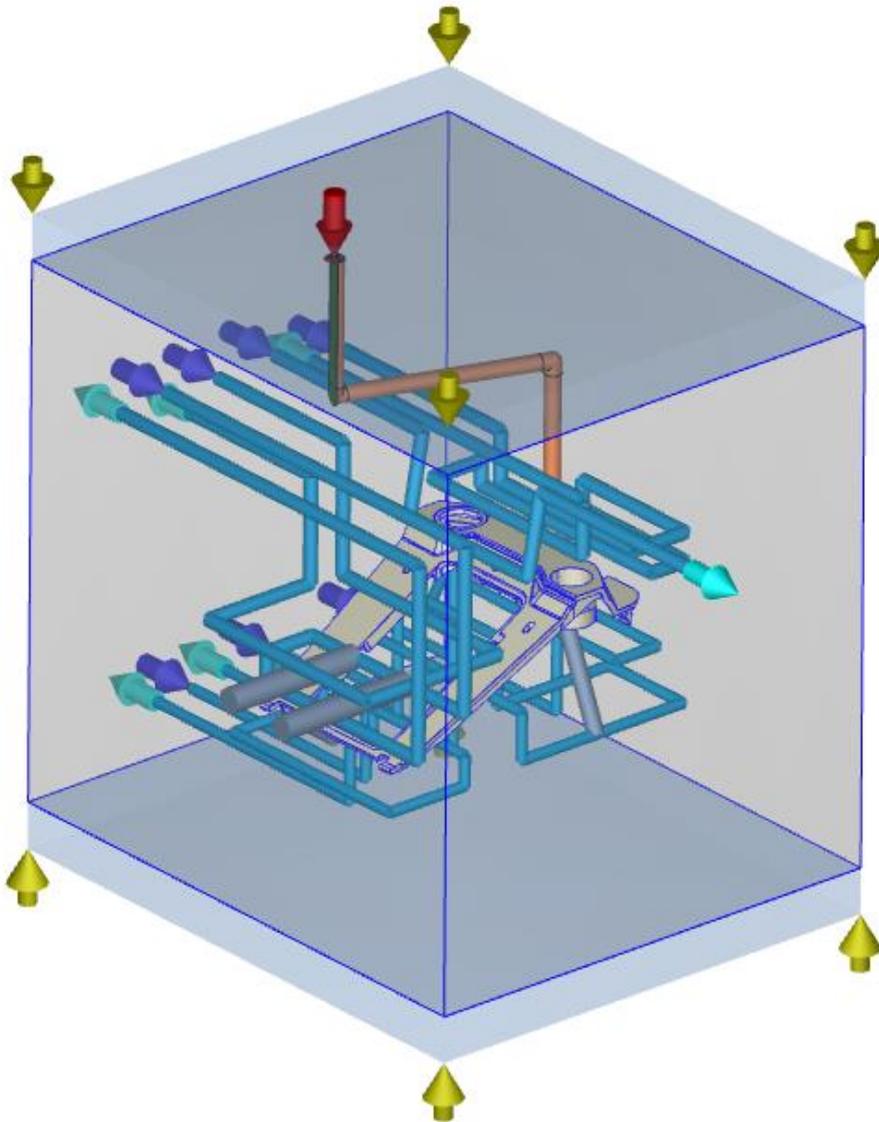
-
- [84] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition." [Online]. Available: www.pearsoned.co.uk/versteeg
- [85] Moldex3D®, "E-learning 2020 – India: Benefits of Boundary Layer Mesh over Auto Meshing in Moldex3D | Events | Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software." <https://www.moldex3d.com/events/past-events/e-learning-2020-india-benefits-of-boundary-layer-mesh-over-auto-meshing-in-moldex3d/> (accessed Apr. 05, 2023).
- [86] Moldex3D®, "Use Boundary Layer Mesh (BLM) for Complex Geometries to Ensure Accuracy of Mold-Filling Analyses | Blog | Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software." <https://www.moldex3d.com/blog/top-story/use-boundary-layer-mesh-blm-for-complex-geometries-to-ensure-accuracy-of-mold-filling-analyses/> (accessed Apr. 05, 2023).
- [87] Moldex3D®, "Find the Optimal Solutions Combining DOE and Molding Simulation | Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software." <https://www.moldex3d.com/blog/top-story/find-the-optimal-solutions-combining-doe-and-molding-simulation/> (accessed Apr. 13, 2023).
- [88] Moldex3D®, "Utilizing Moldex3D DOE to Optimize Processing Parameters | Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software." <https://www.moldex3d.com/blog/tips-and-tricks/utilizing-moldex3d-doe-to-optimize-processing-parameters/> (accessed Apr. 13, 2023).
- [89] Bruker Alicona, "InfiniteFocusSL | 3D measurement system for form & finish | Alicona." <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocussl/> (accessed Apr. 19, 2023).
- [90] Bruker Alicona, "Focus Variation | Form & roughness with one system | Alicona." <https://www.alicon.com/en/our-technology/focus-variation/> (accessed Apr. 20, 2023).
- [91] K. Bryan Horton, "Quantifying a Key Injection Molding Attribute Defect," 1999. [Online]. Available: https://scholarworks.wmich.edu/masters_theses
- [92] X. Sun, P. Tibbenham, D. Zeng, X. Su, S. Huang, and H. tae Kang, "Procedure development for predicting the sink mark of injection molded thermoplastics by finite element method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 9–12, pp. 4095–4107, Aug. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03687-1.
- [93] Autodesk® Moldflow, "Sink mark Prediction Enhancements for 3D Injection Molding Processes."
- [94] S. Jiang, T. Li, X. Xia, X. Peng, J. Li, and P. Zhao, "Reducing the Sink Marks of a Crystalline Polymer Using External Gas-Assisted Injection Molding," *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/3793505.

Anexos

Anexo 1 - Esquema de linhas água do molde a) Bucha, b) Cavidade



Anexo 2 - Modelo de simulação



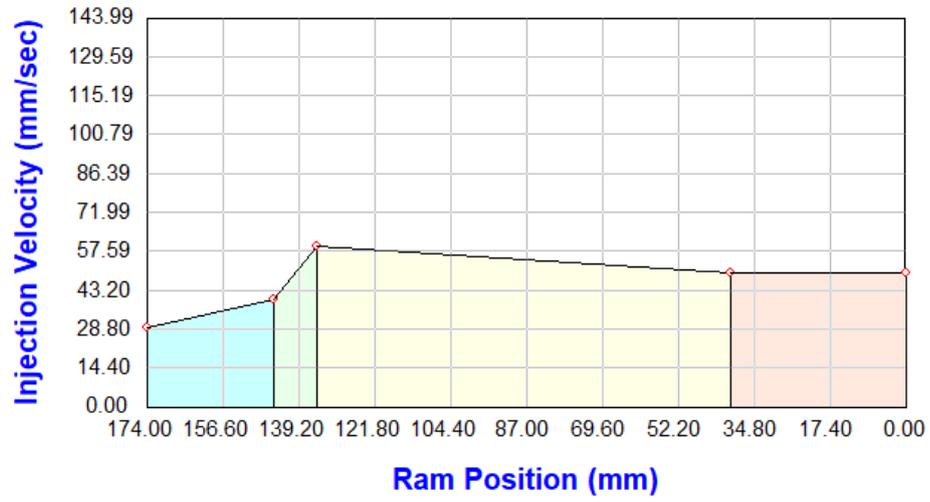
Anexo 3 - Malha da peça



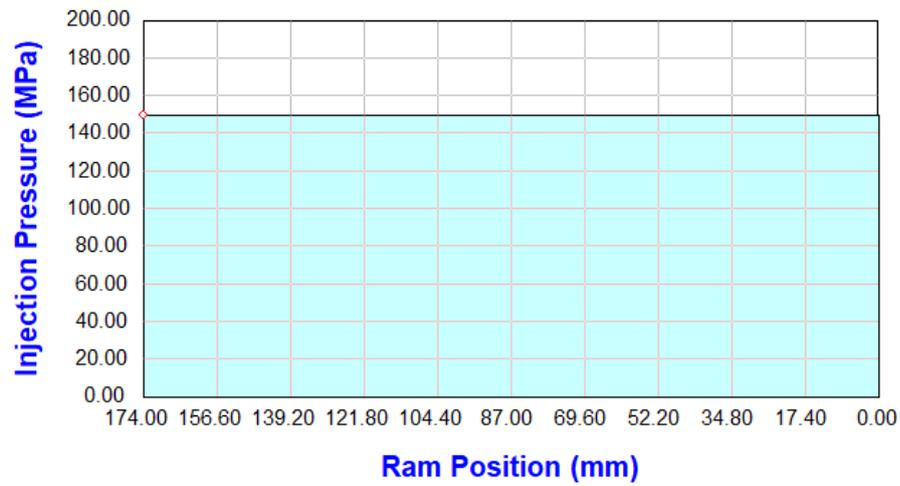
Model Details	
Mesh Type	Solid
Solid Mesh Eleme...	534,046
Part	442,793
Cold Runner	46,271
Hot Runner	44,982

Anexos

Anexo 5 - Perfil de velocidades de injeção



Anexo 6 - Perfil de pressão na fase de injeção



Anexos

Anexo 7 - Perfil de pressão na fase de compactação

