



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E  
INDUSTRIAL

FRANCISCO MANUEL DA SILVA BRANQUINHO ROSA  
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

# VISUALIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA CAMADA SOLIDIFICADA NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SÍNTESE NUMÉRICA DE IMAGEM

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Fevereiro, 2022



# VISUALIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA CAMADA SOLIDIFICADA NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SÍNTESE NUMÉRICA DE IMAGEM

FRANCISCO MANUEL DA SILVA BRANQUINHO ROSA  
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Orientador:** Doutor Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade NOVA de  
Lisboa

**Coorientador:** Doutor José Manuel Cardoso Xavier,  
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade NOVA de  
Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
NOVA de Lisboa

**Vogais:** Doutor Paulo José da Silva Tavares, Investigador Sénior,  
Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e  
Industrial

Doutor Daniel Cardoso Vaz, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Fevereiro, 2022



**Visualização do desenvolvimento da camada solidificada na moldagem por injeção: uma contribuição para a síntese numérica de imagem**

Copyright © Francisco Manuel da Silva Branquinho Rosa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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



*Aos meus pais e irmã*



## Agradecimentos

Ao Professor Daniel Vaz, pela sua disponibilidade e clareza na orientação prestada ao longo do semestre, proporcionando-me a aquisição de conhecimentos não apenas no tema abrangido pela dissertação, como também na área de programação numérica. Saliento a importância das suas indicações para a concretização do trabalho desenvolvido.

Ao Professor José Xavier, pela sua cooperação e observações pertinentes transmitidas sempre que solicitado.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, que através do seu corpo docente foi capaz de cativar o meu interesse pelas diversas áreas de Engenharia Mecânica, revelando sempre um perfeito domínio e entusiasmo pelas matérias lecionadas.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, por me ter inculcido valores e conhecimentos fulcrais para o meu desenvolvimento pessoal, com especial atenção aos professores com os quais me cruzei ao longo do meu percurso académico.

Aos meus colegas de curso, em particular às amigas que ficaram, com os quais tive o prazer de trabalhar e conviver.

Por último, aos meus pais e à minha irmã pelo apoio incansável que me deram ao longo de todos estes anos, difícil de exprimir por palavras. Considero-me grato pelos princípios que me transmitem ano após ano.



# Resumo

---

A moldagem por injeção representa atualmente um dos principais processos de fabrico de artigos plásticos existente na indústria. Apesar da maturidade da tecnologia, não é trivial evitar o aparecimento de defeitos nas peças moldadas, sendo o empeno um dos mais comuns.

Na sequência de estudos do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (FCT/NOVA) para melhor compreender os fenómenos físicos que originam o empeno, pretende-se preparar uma simulação experimental para visualização do processo de desenvolvimento da camada solidificada na moldagem por injeção.

A presente dissertação tem como objetivo estender estudos anteriores, baseados numa abordagem numérica célere para previsão do referido desenvolvimento da camada solidificada, como complemento aos softwares utilizados na indústria, e sintetizar numericamente imagens como as que se esperam vir a obter experimentalmente, para servirem de base a estudos preliminares com técnicas de correlação de imagens.

Como tal, desenvolveu-se um modelo baseado no método das diferenças finitas, quasi-bidimensional, em ambiente *Octave*, para obter sequências temporais de imagens do escoamento de um fluido transparente, com micropartículas nele dispersas, solidificando sobre uma parede plana arrefecida. A modelação do escoamento restringiu-se a uma análise cinemática, assente na descrição e visualização do movimento das partículas. No sentido de conferir uma estrutura flexível ao modelo, definiu-se um conjunto de variáveis de simulação que viabilizam a reprogramação da simulação para diferentes condições de estudo. Estas variáveis foram empregues na definição das dimensões do domínio de estudo ( $L_x$  e  $L_y$ ), da dimensão de cada píxel ( $b$ ), do número de partículas introduzidas no domínio ( $N$ ), do passo de tempo entre imagens sucessivas ( $\Delta_t$ ), do tempo de simulação ( $T_S$ ), das componentes da velocidade das partículas ( $V_x$  e  $V_y$ ) e da perturbação das componentes da velocidade ( $pv_x$  e  $pv_y$ ).

A sequência de imagens gerada demonstra a capacidade do modelo em captar uma evolução da fração sólida de material, adjacente à superfície do molde, para as variáveis de simulação consideradas. Conclui-se que o modelo cinemático concebido permite simular, em primeira aproximação, o escoamento pretendido para diferentes parâmetros de simulação, encontrando-se apto para uma futura inclusão de aspetos dinâmicos.

**Palavras-chave:** Moldagem por injeção; Injeção de polímeros; Síntese numérica de imagens; Camada solidificada; Método das diferenças finitas 2D; Transmissão de calor com mudança de fase.



# Abstract

---

Nowadays, injection molding represents one of the main processes for the manufacture of plastic articles available in the industry. Despite the technology maturity, it is not trivial to avoid the appearance of defects in molded parts, with warpage being one of the most common.

Following studies from The Department of Mechanical and Industrial Engineering (FCT/NOVA) to better understand the physical phenomena that cause warpage, it is aimed to be prepared an experimental simulation to visualize the process of solidified layer development in injection molding.

This dissertation aims to extend previous studies, based on a swift numerical approach to predict the development of the solidified layer, as a complement to the software used in the industry, and to numerically synthesize images such as those expected to be obtained experimentally, to serve as a basis to preliminary studies with image correlation techniques.

As such, a model was developed based on the finite difference method, quasi-two-dimensional, in Octave environment, to obtain temporal sequences of images regarding the flow of a transparent fluid, with microparticles dispersed in it, solidifying over a flat cooled wall. The flow modelling was restricted to a kinematic analysis, based on the description and visualization of the particle's movement. To provide a flexible structure to the model, a set of simulation variables was defined that enables the reprogramming of the simulation for different study conditions. These variables were used to define the dimensions of the study domain ( $L_x$  and  $L_y$ ), the size of each pixel ( $b$ ), the number of particles introduced into the domain ( $N$ ), the time step between successive images ( $\Delta_t$ ), the simulation time ( $T_S$ ), the particles velocity components ( $V_x$  and  $V_y$ ) and the perturbation of the velocity components ( $pv_x$  and  $pv_y$ ).

The generated image sequence reveals the model's ability to capture an evolution of the solid fraction of material, adjacent to the mold surface, for the simulation variables considered. It is concluded that the developed kinematic model allows simulating, to first approximation, the intended flow for different simulation parameters, being suitable for a future inclusion of dynamic aspects.

**Keywords:** Injection molding; Polymer injection; Numerical image synthesis; Frozen layer; 2D finite difference method; Heat transfer with phase change.

---



# Conteúdos

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação .....	1
1.2. Revisão bibliográfica .....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Estrutura da dissertação .....	4
<b>2. Moldagem por Injeção.....</b>	<b>5</b>
2.1. Contextualização do processo.....	5
2.2. Referência histórica .....	5
2.3. Descrição do processo .....	6
2.4. Máquina injetora .....	8
2.4.1. <i>Unidade de controlo</i> .....	9
2.4.2. <i>Unidade de aperto</i> .....	11
2.4.3. <i>Molde</i> .....	12
2.4.4. <i>Unidade de injeção</i> .....	15
2.5. Polímeros .....	17
2.6. Camada solidificada.....	19
2.7. Empeno .....	20
<b>3. Metodologias e Equipamentos .....</b>	<b>23</b>
3.1. Caso de estudo .....	23
3.2. Síntese de imagens.....	25
3.2.1. <i>Domínio de estudo</i> .....	26
3.2.2. <i>Partículas</i> .....	27
3.2.3. <i>Sequência temporal de imagens</i> .....	30
3.2.4. <i>Perturbação de velocidade</i> .....	33
3.2.5. <i>Entrada e saída de partículas do domínio</i> .....	34

3.2.6. Limitação do passo de tempo.....	36
3.2.7. Formação da camada solidificada.....	37
3.2.8. Correção da entrada de partículas no domínio.....	38
3.2.9. Correção da coordenada y na esteira dos retângulos .....	39
<b>4. Resultados.....</b>	<b>41</b>
4.1. Introdução .....	41
4.2. Imagens geradas.....	42
4.3. Análise da sequência de imagens .....	47
<b>5. Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro.....</b>	<b>49</b>
5.1. Conclusões .....	49
5.2. Sugestões de trabalho futuro .....	50
5.2.1. Aperfeiçoamento das imagens sintetizadas.....	50
5.2.2. Aparato experimental.....	51
<b>Referências.....</b>	<b>53</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – FASES DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO (ADAPTADO DE (XIE ET AL., 2011)) .....	7
FIGURA 2.2 – MÁQUINA INJETORA DE FUSO (RETIRADO DE (FISCHER, 2012)) .....	8
FIGURA 2.3 – UNIDADES CONSTITUINTES DE UMA MÁQUINA INJETORA DE FUSO (ADAPTADO DE (VALERO, 2020)) ..	9
FIGURA 2.4 – RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DO MATERIAL, VARIÁVEIS DA MÁQUINA, VARIÁVEIS DO PROCESSO E QUALIDADE DA PEÇA MOLDADA (ADAPTADO DE (KAMAL ET AL., 2009)).....	10
FIGURA 2.5 – SISTEMA DE CONTROLO (ADAPTADO DE (KAMAL ET AL., 2009)).....	10
FIGURA 2.6 – UNIDADE DE APERTO HIDRÁULICA (ADAPTADO DE (ROSATO ET AL., 2000)) .....	12
FIGURA 2.7 – METADES DO MOLDE E SISTEMA DE EXTRAÇÃO (ADAPTADO DE (GEOMIQ, 2021)).....	13
FIGURA 2.8 – MOLDAÇÃO DE CAVIDADES MÚLTIPLAS E SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO (ADAPTADO DE (KAZMER, 2007)) .....	15
FIGURA 2.9 – UNIDADE DE INJEÇÃO (ADAPTADO DE (KAMAL ET AL., 2009)) .....	16
FIGURA 2.10 – ZONAS INTEGRANTES DO FUSO (ADAPTADO DE (KAMAL ET AL., 2009)).....	17
FIGURA 2.11 – ESTRUTURA DO MONÓMERO (PROPILENO) E DO POLÍMERO (POLIPROPILENO) (ADAPTADO DE (GEDDE E HEDENQVIST, 2019)) .....	17
FIGURA 2.12 – CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS (ADAPTADO DE (LOVELL E YOUNG, 2011)) .....	18
FIGURA 2.13 – <i>FOUNTAIN FLOW</i> .....	19
FIGURA 2.14 – COMPONENTE PROJETADO (ESQUERDA) E COMPONENTE SUJEITO A EMPENO (DIREITA) .....	20
FIGURA 2.15 – ORIENTAÇÃO MOLECULAR DIFERENCIADA (ADAPTADO DE (FISCHER, 2012)).....	21
FIGURA 2.16 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES INDUZIDAS PELO ESCOAMENTO (ADAPTADO DE (GUEVARA-MORALES E FIGUEROA-LÓPEZ, 2014)) .....	22
FIGURA 3.1 – FONTE LINEAR BIDIMENSIONAL.....	23
FIGURA 3.2 – ZONA DO MOLDE CONSIDERADA PARA O ESTUDO.....	25
FIGURA 3.3 – DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO EM ELEMENTOS QUADRÁTICOS DE LADO $B$ .....	26
FIGURA 3.4 – MATRIZ DE PÍXEL .....	27
FIGURA 3.5 – DISPOSIÇÃO GEOMÉTRICA DOS QUATRO PÍXEIS CONSTITUINTES DE UMA PARTÍCULA .....	29
FIGURA 3.6 – ESCALA DE CINZENTO .....	29
FIGURA 3.7 – MATRIZ TRIDIMENSIONAL UTILIZADA PARA ARMAZENAR AS CORES DE CADA PARTÍCULA .....	29

FIGURA 3.8 – REPRESENTAÇÃO DE UMA PARTÍCULA NA MATRIZ DE PÍXEL.....	30
FIGURA 3.9 – ATUALIZAÇÃO DAS MATRIZES $D$ E $A$ PARA CADA PASSO DE TEMPO .....	32
FIGURA 3.10 – ATUALIZAÇÃO DA MATRIZ DE PÍXEL PARA CADA PASSO DE TEMPO .....	32
FIGURA 3.11 – FLUTUAÇÕES ALEATÓRIAS DE VELOCIDADE EM TORNO DE $V_x$ (ADAPTADO DE (MUNSON ET AL., 2013)) .....	33
FIGURA 3.12 – ESQUEMA DA ENTRADA E SAÍDA DE PARTÍCULAS DO DOMÍNIO DE ESTUDO DEFINIDO NUMA MONTAGEM EXPERIMENTAL .....	34
FIGURA 3.13 – ÁREA DE INTRODUÇÃO DE NOVAS PARTÍCULAS NO DOMÍNIO IDENTIFICADA A TRACEJADO .....	35
FIGURA 3.14 – GRÁFICO DA DISTÂNCIA CARACTERÍSTICA ENTRE PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PARTÍCULAS CONTIDAS NUM DETERMINADO DOMÍNIO .....	37
FIGURA 3.15 – FORMAÇÃO DE RETÂNGULOS ADJACENTES EM PASSOS DE TEMPO SUCESSIVOS.....	38
FIGURA 3.16 – CORREÇÃO DA ENTRADA DO DOMÍNIO .....	39
FIGURA 3.17 – VAZIO DE PARTÍCULAS NA ESTEIRA DOS RETÂNGULOS.....	39
FIGURA 3.18 – CORREÇÃO DA COORDENADA $y$ DE UMA PARTÍCULA NA ESTEIRA DE UM RETÂNGULO GENÉRICO $I$ .....	40
FIGURA 4.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SEQUÊNCIA DE IMAGENS.....	41
FIGURA 4.2 – PRIMEIRA IMAGEM DA SEQUÊNCIA .....	43
FIGURA 4.3 – SEGUNDA IMAGEM DA SEQUÊNCIA.....	44
FIGURA 4.4 – TERCEIRA IMAGEM DA SEQUÊNCIA.....	45
FIGURA 4.5 – QUARTA IMAGEM DA SEQUÊNCIA.....	46
FIGURA 5.1 – ESQUEMA DO CONCEITO DO APARATO EXPERIMENTAL, MOSTRANDO AS PARTÍCULAS DISPERSAS NO SEU PLANO MÉDIO. AS PROPORÇÕES PODEM NÃO CORRESPONDER À CONCRETIZAÇÃO FINAL DO APARATO. ....	52

## **Lista de Tabelas**

TABELA 2.1 – VARIÁVEIS DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO (KAMAL ET AL., 2009).....	11
TABELA 4.1 – VALORES DEFINIDOS PARA AS VARIÁVEIS DE SIMULAÇÃO. ....	42



## Lista de Símbolos

$A$	Matriz com as coordenadas das partículas em unidades de píxel
$b$	Dimensão do lado de cada píxel [m]
$C$	Matriz de píxel
$D$	Matriz com as coordenadas das partículas em unidades de comprimento
$\Delta_S$	Passo espacial [m]
$\Delta_t$	Passo de tempo [s]
$L^*$	Distância característica entre partículas [m]
$L_x$	Dimensão horizontal do domínio [m]
$L_y$	Dimensão vertical do domínio [m]
$N$	Número de partículas introduzidas no domínio
$pv_x$	Flutuação aleatória de velocidade em torno de $V_x$ [m/s]
$pv_y$	Flutuação aleatória de velocidade em torno de $V_y$ [m/s]
$V_x$	Componente horizontal da velocidade das partículas [m/s]
$V_y$	Componente vertical da velocidade das partículas [m/s]



# 1

## Introdução

---

### 1.1. Motivação

Atualmente, assistimos a um aumento da procura e especificidade dos mais diversos artigos nos diferentes setores industriais, sendo de extrema relevância para as empresas, a produção dos mesmos tendo em vista a maximização da relação qualidade/custo de produção. Esta necessidade de produzir artigos que cumpram os requisitos de qualidade a um baixo custo, bem como a obtenção de peças com melhores propriedades mecânicas e maior rigor dimensional, são exemplos de catalisadores que promovem a constante evolução dos processos tecnológicos de fabrico, levando, conseqüentemente, ao estudo dos fenómenos físicos que sucedem no decorrer dos mesmos.

A moldagem por injeção, inicialmente desenvolvida no final do século XIX, representa nos dias de hoje uma das principais tecnologias de produção utilizadas no setor industrial. Caracterizada pela sua notória capacidade em produzir componentes tridimensionais de geometria complexa a elevadas taxas de produção, esta é aplicável na produção de componentes poliméricos, nos quais se destacam os termoplásticos e termoendurecíveis. Nos primeiros anos desta tecnologia, a sua aplicabilidade restringia-se à produção de artigos de forma geométrica simples para um número escasso de indústrias, o que contrasta com a diversidade de indústrias que, atualmente, dependem deste processo para a obtenção de um vasto leque de componentes com as mais variadas formas geométricas. Entre estas indústrias são de destacar a automóvel, aeroespacial, médica e de brinquedos.

Um defeito muito comum nos componentes obtidos por moldagem por injeção é o fenómeno do empeno, causado por uma contração anisotrópica do material durante o seu arrefecimento. Este defeito é responsável pela flexão/distorção do artigo moldado, provocando uma alteração tanto das suas dimensões como da sua geometria final. Na indústria, é usual a utilização de softwares de simulação numérica por forma a garantir uma correta conceção dos

moldes, permitindo também uma análise ao impacto que as variáveis envolvidas no processo têm no produto final, a fim de serem evitados defeitos geométricos nos artigos. Apesar destas ferramentas de trabalho serem bastante úteis para os profissionais do setor numa fase inicial de projeto, a sua complexidade e longos tempos de simulação são alguns dos domínios que requerem desenvolvimento. De facto, uma introdução incorreta dos inúmeros parâmetros de simulação pelo utilizador, pode levar a conclusões erradas e morosas, que, em primeira instância, poderiam ser evitadas com a utilização de métodos mais simples e céleres.

## 1.2. Revisão bibliográfica

Dada a importância que a moldagem por injeção assumiu na indústria, diversos estudos foram realizados no sentido de se alcançar uma melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem no processo. Os conceitos e métodos desenvolvidos no decurso dessas investigações são continuamente transferidos para a escala industrial, constatando-se um aperfeiçoamento da qualidade das peças obtidas por esta tecnologia. Seguidamente, serão descritos de uma forma sucinta, estudos realizados na área de injeção de plásticos realizados ao longo das últimas décadas, tendo-se concentrado a pesquisa nas temáticas de visualização e transferência de calor relativas ao processo de moldagem por injeção.

As técnicas de visualização dinâmica do interior da cavidade moldante, consistem na aquisição direta de imagens do fenómeno de moldação, mediante utilização de sistemas de vídeo de alta velocidade. Spencer e Gilmar (1950), iniciaram o método de visualização dinâmica com o desenvolvimento do *Photo Mold*. Nesse estudo, uma estrutura semelhante a uma câmara de reflexo de lente única foi instalada no molde de uma máquina injetora, possibilitando o registo do interior da cavidade do molde durante o processo de moldação, a 64 imagens por segundo. Através desta experiência, foram observados e propostos conceitos importantes referentes ao fenómeno de moldação, atualmente considerados como aspetos fundamentais do processo.

Kamal et al. (1974), com a finalidade da obtenção de dados experimentais necessários à modelação teórica do processo de injeção, realizaram um estudo no qual foi visualizado, a 200 imagens por segundo, os padrões de enchimento da cavidade do molde. Simultaneamente, através de sensores instalados no molde, foram registados os perfis de pressão para diferentes distâncias ao ponto de injeção.

Na tecnologia de moldagem por injeção, durante a fase de arrefecimento, a pressão no interior da cavidade do molde atinge o seu valor mínimo e um espaço de ar é formado entre o polímero e a superfície do molde devido à contração volumétrica do material, originando uma mudança significativa na transferência de calor na interface polímero/molde. Com o intuito de analisar os mecanismos de transferência de calor, Bendada et al. (2004) procederam a um estudo experimental da análise da resistência térmica de contacto entre o polímero e o molde na

moldagem por injeção. Nesse ensaio experimental foi utilizado um pirómetro, ou *infrared waveguide pyrometer* na literatura inglesa, para monitorizar a temperatura da superfície do polímero no interior da cavidade do molde. Uma sonda de dois termopares, *two-thermocouple probe*, foi utilizada para determinar, via um problema inverso, o fluxo de calor local que atravessava a interface polímero/molde e a temperatura registada na superfície da cavidade. Seguidamente, um segundo algoritmo inverso foi utilizado de forma a obter o valor da resistência térmica de contacto. Os resultados demonstraram que a resistência térmica de contacto entre o polímero e o molde não é desprezável, varia em função do tempo e está fortemente associada às variáveis do processo de moldagem.

Wang e Young (2005), investigaram as tensões residuais desenvolvidas na moldagem por injeção de componentes de parede fina. Foi utilizado o método de remoção de camadas, ou como expresso na literatura inglesa: *Layer Removal Method*, para a medição das tensões residuais numa amostra de teste de parede plana fina, revelando-se adequado para a situação em foco. Visto que o estudo foi realizado para diferentes condições, concluiu-se que o comportamento das tensões residuais nas peças produzidas por esta tecnologia é afetado pelas diferentes variáveis do processo, tais como: temperatura do fundido, temperatura do molde, pressão de compactação e tempo de injeção.

Liu e Gehde (2015), efetuaram um estudo que se focou na avaliação do coeficiente de transmissão térmica entre o polímero e a superfície da cavidade do molde, com o intuito de melhorar a precisão de simulação numérica da cristalinidade e da taxa de arrefecimento na moldagem por injeção. Experimentalmente, foi medida a temperatura na zona de interface polímero/molde para diferentes temperaturas do fundido, caudais volúmicos de injeção e rugosidades superficiais do molde. Após as medições de temperatura, e fazendo uso de um modelo matemático previamente concebido, foram obtidos os coeficientes de transmissão térmica junto da superfície da cavidade, num ciclo de injeção, para as diferentes medições realizadas. Com base nestes valores, foram conduzidas simulações numéricas no programa *Moldflow*, permitindo comparar a cristalinidade relativa obtida nas simulações com a obtida pela técnica de calorimetria diferencial por varrimento. Concluiu-se que o coeficiente de transmissão térmica influencia, significativamente, a simulação da taxa de arrefecimento e cristalinidade.

Recentemente, Frederico (2020) estudou o desenvolvimento da camada solidificada na moldagem por injeção para escoamento sobre um plano arrefecido. Nesse estudo, foi concebido um modelo matemático simplificado, implementado em código *Octave*, para a situação quasi-unidimensional em que o material fundido escoava sobre uma parede plana arrefecida que representa a superfície do molde. A partir de um balanço energético realizado a camadas de material sucessivas, foi obtido um sistema de equações que, posteriormente resolvido, descreve a forma da camada solidificada num dado instante. O impacto dos parâmetros do processo foi analisado

para averiguar a sua influência na solução, sendo também interpretados os números adimensionais associados ao modelo.

### 1.3. Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo sintetizar uma sequência temporal de imagens, relativas ao processo de escoamento, com solidificação, de um fluido transparente com partículas dispersas sobre uma parede plana arrefecida. Pretende-se, assim, mimetizar as imagens que se preveem registar numa futura montagem experimental do processo, com o objetivo de ser desenvolvido um algoritmo capaz de estimar a evolução da espessura da camada solidificada por processamento das imagens sintetizadas, antes de este ser usado em contexto real com custos associados.

Espera-se que o presente trabalho contribua para o desenvolvimento de métodos céleres de previsão do fenómeno do empeno nos componentes produzidos por moldagem por injeção, constituindo uma mais-valia para os profissionais do setor numa fase inicial de projeto.

### 1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo o conteúdo destes apresentados de seguida, à exceção do Capítulo 1.

O Capítulo 2 tem como finalidade integrar o leitor na tecnologia de produção abrangida pela dissertação. Para esse fim, começa-se por contextualizar o processo de moldagem por injeção, referir a sua origem e evolução ao longo dos anos. Segue-se uma descrição do processo, do equipamento tecnológico utilizado e das unidades que o constituem. Por último, é realizada uma breve abordagem aos polímeros, formação da camada solidificada e ao defeito geométrico impulsionador deste trabalho.

No Capítulo 3, é descrito, com minúcia, as metodologias e software empregues para a concretização da sequência temporal de imagens sintetizadas. Em primeira instância, é apresentado o caso de estudo considerado e as simplificações daí resultantes. Posteriormente, são decompostas as etapas seguidas durante a execução do trabalho, sempre com o propósito de tornar claro, para o leitor, a implementação numérica das soluções desenvolvidas.

No Capítulo 4, é exibida uma pequena sequência de imagens geradas pelo código desenvolvido no decurso da dissertação. Começa-se por esclarecer a seleção de imagens incluídas no documento. São definidas as variáveis de simulação utilizadas na geração das referidas imagens. Por fim, é exibida a sequência de imagens e feita uma análise às mesmas.

No Capítulo 5, são apresentadas conclusões e sugestões de trabalho futuro, sendo indicadas melhorias a implementar de maneira a tornar as imagens sintetizadas mais realistas e expostos conceitos introdutórios associados à concretização de uma futura montagem experimental.

# 2

## Moldagem por Injeção

---

### 2.1. Contextualização do processo

A moldagem por injeção encontra-se associada aos processos tecnológicos de fundição, que têm como objetivo fundamental, a conformação de um fundido no interior de uma cavidade delimitada pelo molde, para após solidificação se obter o componente inicialmente idealizado, ou seja, a técnica de fundição assenta no princípio clássico de Arquimedes, que dita que um líquido toma a forma do vaso que o contém. Esta tecnologia de fabrico, permite a produção de peças com as mais diversas formas geométricas numa vasta gama de materiais, à qual se acrescenta uma otimização do fator económico, visto que é o processo mais direto entre a matéria prima e o produto final.

Na indústria, é comum a distinção entre os processos de moldagem por injeção, denominado na literatura inglesa de *injection molding*, e fundição injetada, *die casting*. Apesar de ambas as técnicas apresentarem o mesmo princípio de funcionamento, descrito pela injeção a alta pressão de um material no estado líquido para o interior de um molde metálico, as mesmas diferem no tipo de material a ser injetado. Para o processo de injeção de um material polimérico atribui-se a designação de moldagem por injeção, enquanto que para a injeção de um material metálico o processo é designado de fundição injetada. Esta diferenciação de processos é refletida a nível tecnológico, uma vez que a máquina injetora é escolhida em função do tipo de material a injetar, por forma a atender aos diferentes requisitos impostos no processamento de um material polimérico e de um metálico, sendo o mais evidente a temperatura de fusão mais elevada dos metais em relação à dos polímeros.

### 2.2. Referência histórica

A injeção de polímeros teve origem no final do século XIX, mais precisamente no ano de 1872, no qual o inventor norte-americano *John Wesley Hyatt*, conjuntamente com o seu irmão

*Isaiah Hyatt*, patentearam a primeira máquina de moldagem por injeção, utilizada para o fabrico de artigos constituídos por celulóide, dando, assim, origem à indústria de plásticos. Nas décadas seguintes, investigações desenvolvidas na área de injeção de plásticos, permitiram aplicar este processo no fabrico de diversos componentes, sendo que por volta de 1920 a indústria de moldagem por injeção já se encontrava consolidada no mercado. Durante os anos de 1940, a Segunda Guerra Mundial levou a um crescimento exponencial da indústria de moldagem por injeção, provocado por um aumento da procura de produtos fabricados a larga escala e a baixo custo. Nesse período temporal, verificou-se um contínuo desenvolvimento de novos materiais utilizados no processo de injeção, assim como de avanços tecnológicos que resultaram no sucesso de novas aplicações (Bryce, 1996).

Atualmente, a moldagem por injeção é um processo automatizado, cíclico, caracterizado pela capacidade de fabricar a baixo custo, componentes de geometria complexa a uma elevada taxa de produção. Estas qualidades reconhecidas ao processo, fazem com que o mesmo ocupe uma posição de destaque no setor industrial, constituindo uma das principais técnicas de moldagem de polímeros, juntamente com a extrusão, utilizada para o fornecimento de uma ampla gama de componentes a diversas indústrias.

A evolução tecnológica na área de injeção de plásticos é tema de várias investigações atuais, que incidem maioritariamente o seu foco nas seguintes áreas (Bryce, 1996):

- Aumento da eficiência energética do processo;
- Projeto de moldes capazes de produzir peças de grandes ou pequenas dimensões;
- Utilização de diferentes materiais para o fabrico de moldes;
- Desenvolvimento de novos polímeros.

### 2.3. Descrição do processo

De uma forma geral, a tecnologia de moldagem por injeção consiste na injeção de um polímero no estado líquido, proveniente de um reservatório (cilindro aquecido), para o interior de um molde fechado, permitindo ao plástico arrefecer e solidificar para posterior ejeção do componente (Bryce, 1996).

Para um conhecimento introdutório do processo, torna-se pertinente analisar as diferentes etapas envolvidas num ciclo de moldação, definido pelo conjunto de operações realizadas na produção de duas peças consecutivas. No decorrer de um ciclo de moldação, é possível diferenciar-se quatro fases distintas, como ilustrado na Figura 2.1.

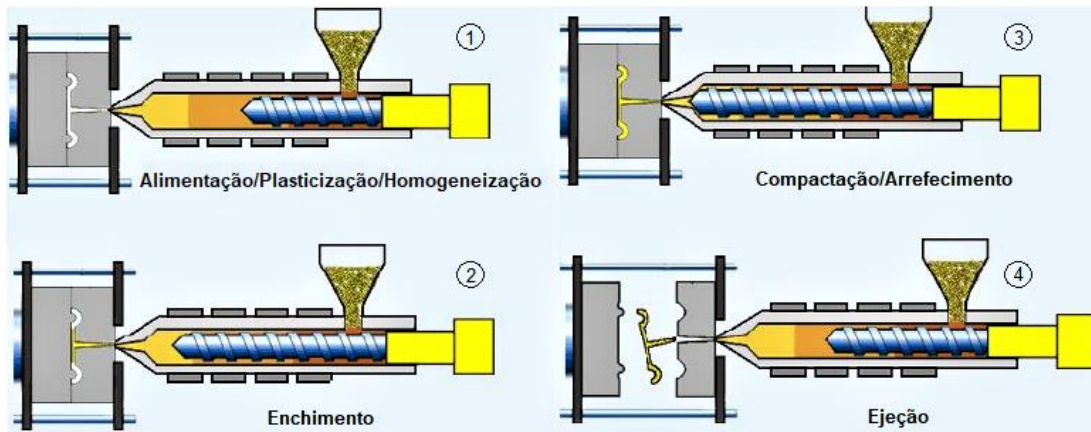


Figura 2.1 – Fases do processo de moldagem por injeção (adaptado de (Xie et al., 2011))

- 1) **Alimentação/ Plasticização/ Homogeneização:** Numa primeira fase, granulados de plástico são transportados ao longo de um fusor em rotação, inserido no interior de um cilindro, sendo plasticizados por ação simultânea do calor proveniente de bandas de aquecimento que envolvem o exterior do cilindro, assim como pelo calor gerado pela fricção do fusor no decurso do seu movimento de rotação. Por sua vez, a rotação do fusor promove uma homogeneização do material plástico, direcionando o mesmo para uma câmara de injeção que serve de espaço de espera, *holding space*, enquanto o componente previamente injetado arrefece.
- 2) **Enchimento:** Esta fase inicia-se com o avanço controlado do fusor, já sem movimento de rotação, na direção do molde, originando o enchimento da cavidade do molde com plástico fundido proveniente da câmara de injeção. Na sucessão do seu trajeto para o molde, o polímero fluidizado é escoado através do sistema de alimentação, que assegura um enchimento correto da cavidade moldante. Previamente à injeção do material, o molde é fechado com uma pressão adequada por forma a não abrir sobre ação da pressão que se verifica durante a injeção do polímero.
- 3) **Compactação/ Arrefecimento:** A fase de compactação do ciclo tem início, assim que se verifica o total enchimento do molde. Nesta fase, é mantida pressão no plástico que se encontra na cavidade do molde, sendo injetada uma pequena quantidade de material de modo a compensar a contração volumétrica do plástico durante o seu arrefecimento (Fischer, 2012). À medida que o polímero arrefece, a sua solidificação causa o isolamento da cavidade do molde relativamente à unidade de alimentação, permitindo uma redução da pressão existente na cavidade conforme a temperatura do material diminui (Kamal et al., 2009).

- 4) **Ejeção:** Esta fase é caracterizada pela extração do artigo do molde, iniciando-se no instante em que é atingida a temperatura de desmoldagem, *demolding temperature*. Esta temperatura para a qual se dá a ejeção da peça, é definida como a temperatura que é necessária alcançar, na região mais quente da peça moldada (usualmente o centro da parede mais espessa), antes de a peça puder ser extraída de forma segura, isto é, sem o risco de distorção por falta de rigidez (Fischer, 2012).

## 2.4. Máquina injetora

Como constado no subcapítulo 2.3, a concretização do processo de moldagem por injeção depende de uma série de operações, que realizadas de forma uníssona permitem o fabrico do componente inicialmente idealizado. O equipamento tecnológico utilizado para a execução do processo é designado de máquina injetora. É função deste equipamento (Rosato et al., 2000):

- Fundir o granulado plástico;
- Injetar um volume doseado de material para o molde;
- Manter o material injetado sob pressão durante um intervalo de tempo definido;
- Arrefecer de forma controlada o componente moldado;
- Controlar a abertura e fecho do molde.



Figura 2.2 – Máquina injetora de fusão (retirado de (Fischer, 2012))

De modo a executar as tarefas que lhe são afetas, a máquina injetora é constituída por cinco unidades (Figura 2.3), sendo a cada uma incumbida uma função específica como descrito seguidamente:

- ▶ **Unidade de injeção** - Responsável pela alimentação, plasticização e injeção do polímero;
- ▶ **Unidade de aperto** - Caracterizada pela aplicação de uma força de aperto durante as fases de enchimento e compactação, assegurando que o molde permanece fechado durante estas etapas do ciclo;
- ▶ **Molde** - Encarregue de conformar, conter e arrefecer o plástico fundido;

- ▶ **Unidade de controlo** - Possibilita a definição e controlo das diversas variáveis do processo, tais como a temperatura do molde e a velocidade de injeção, mediante utilização de um controlador lógico programável;
- ▶ **Unidade de potência** - Acomoda a unidade hidráulica, responsável por assegurar o fornecimento de fluido hidráulico aos atuadores do equipamento.

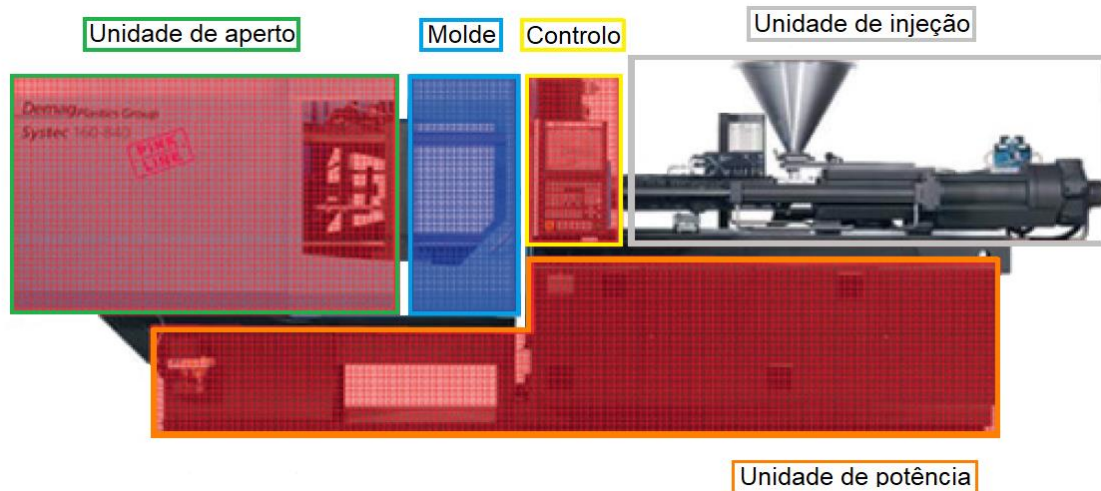


Figura 2.3 – Unidades constituintes de uma máquina injetora de fuso (adaptado de (Valero, 2020))

Com o intuito de se fornecer um conhecimento mais aprofundado do tema, será descrito, de seguida, cada uma das unidades da máquina injetora em maior detalhe, à exceção da unidade de potência, descrição da qual não acrescentaria conhecimento relevante para o tópico de injeção de plásticos, visto se tratar, na sua essência, de um sistema hidráulico.

#### 2.4.1. Unidade de controlo

A tecnologia de moldagem por injeção é reconhecida pela sua complexidade, inerente a ser um processo dinâmico, não linear, no qual os parâmetros da máquina injetora, propriedades do material e variáveis do processo interagem entre si, determinando a qualidade do componente moldado (Kamal et al., 2009). Esta relação associada ao processo de injeção de plásticos pode ser analisada na Figura 2.4.

De modo a garantir a qualidade e repetibilidade dos produtos moldados, torna-se indispensável a inclusão de um sistema de controlo, que tem como funções principais: a manipulação da sequência de operações do equipamento, o controlo das principais variáveis do processo, e a monitorização, em tempo real, do estado e performance do processo. Este controlo, não só é ajustado no decurso de um ciclo de moldação, como também de ciclo para ciclo (Kamal et al., 2009).

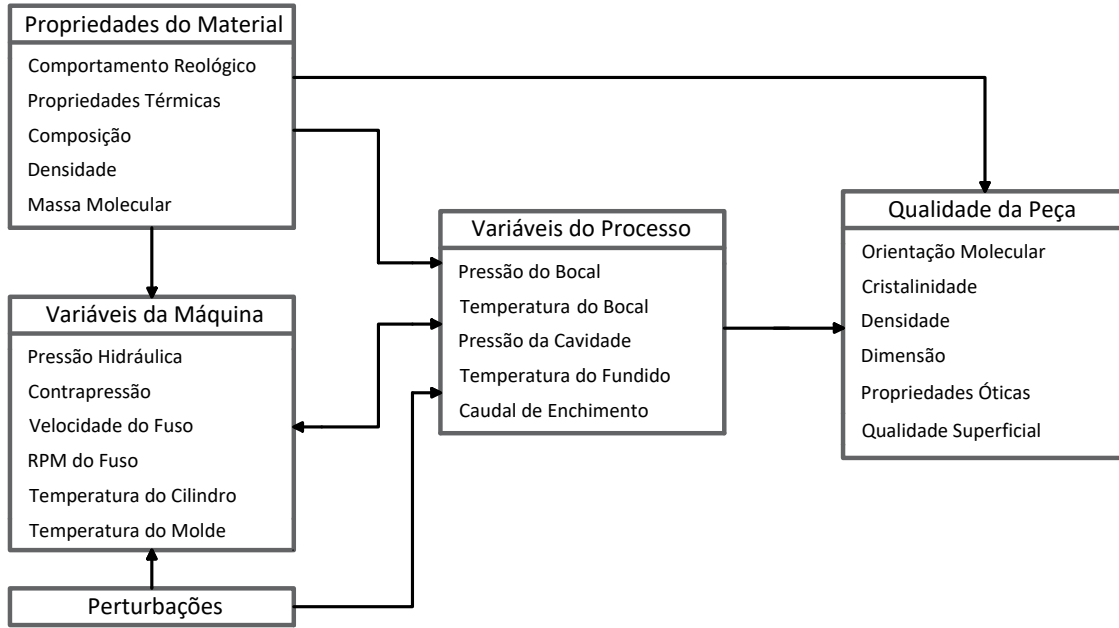


Figura 2.4 – Relação entre propriedades do material, variáveis da máquina, variáveis do processo e qualidade da peça moldada (adaptado de (Kamal et al., 2009))

Um sistema de controlo compreende um processo com uma variável a ser controlada, um atuador que executa a ação de controlo e um controlador que, por sua vez, dá o sinal de comando ao atuador. O sinal de saída é medido, por intermédio de um transdutor, e comparado com o sinal de referência, sendo o erro entre a saída e a referência utilizado como *input* do controlador (Kamal et al., 2009).

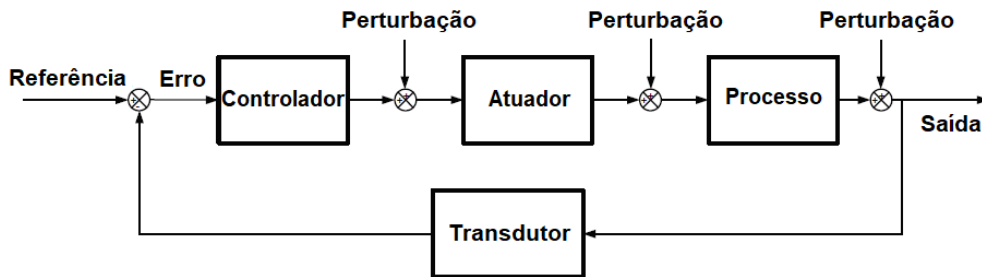


Figura 2.5 – Sistema de controlo (adaptado de (Kamal et al., 2009))

Para o caso da moldagem por injeção, pode ser dado como exemplo o controlo da velocidade de injeção durante a fase de enchimento do molde, em que o processo é a unidade de injeção, a velocidade de injeção a variável a ser controlada e o atuador uma válvula hidráulica. Numa primeira instância, a velocidade de injeção é medida e comparada com a velocidade desejada. Posteriormente, através de um controlador corretamente programado, o sistema é capaz de ajustar, automaticamente, a abertura da válvula hidráulica, de forma a corrigir um possível desvio da velocidade registada em relação à velocidade de referência. Este controlo preciso da

velocidade de injeção, permite um enchimento harmonioso da cavidade moldante, evitando o aparecimento de vários defeitos geométricos nos componentes fabricados (Kamal et al., 2009).

Na tabela abaixo, pode-se observar as variáveis a serem controladas no processo de moldagem por injeção, as quais são classificadas em termos de temperatura, pressão e velocidade.

**Tabela 2.1 – Variáveis do processo de moldagem por injeção (Kamal et al., 2009).**

	<b>Temperatura</b>	<b>Pressão</b>	<b>Velocidade</b>
<b>Variáveis</b>	Temperatura do fundido Temperatura do cilindro Temperatura do molde	Pressão hidráulica Pressão do bocal Pressão da cavidade Pressão de injeção Pressão de aperto do molde	Velocidade linear do fuso Velocidade angular do fuso Velocidade do molde Velocidade de injeção

#### 2.4.2. Unidade de aperto

Como referido anteriormente, esta unidade tem a função de manter o molde fechado sob ação da pressão elevada que se verifica durante as fases de enchimento e compactação, sendo também responsável pela abertura e fecho do molde, permitindo a extração do artigo moldado e respetiva produção de um seguinte.

A unidade de aperto de uma máquina injetora é caracterizada pela força de aperto máxima que o equipamento é capaz de produzir, em que a força de aperto necessária para uma dada aplicação, é calculada através do produto da área projetada do componente pela pressão máxima existente na cavidade do molde (Valero, 2020). Dependendo do polímero a injetar, assim será ajustada a pressão de injeção e, correspondentemente, a força de aperto necessária para manter o molde fechado. Polímeros que apresentem maiores valores de viscosidade, requerem uma pressão de injeção mais elevada e, portanto, uma maior força de aperto em comparação com polímeros menos viscosos.

Na indústria, é possível encontrar-se diversos tipos de sistemas de aperto, sendo o mais usual o sistema hidráulico. Na Figura 2.6, é ilustrada uma configuração típica de uma unidade de aperto hidráulica, constituída por duas placas, uma móvel e uma fixa, às quais são ligadas as metades do molde. Por intermédio de um cilindro hidráulico, é aplicada uma força na placa móvel, disponibilizando, assim, a força requerida para contrariar a pressão a que está sujeito o molde durante o processo de injeção, assegurando que ambas as metades do molde permanecem ligadas durante as fases de enchimento e compactação do ciclo.

A abertura e fecho do molde é realizado mediante o controlo da posição da placa móvel, sendo a sua translação imposta pelo cilindro hidráulico que se encontra conectado à respetiva

placa. Os quatro tirantes inclusos no sistema, providenciam suporte às placas, permitindo o deslizamento da placa móvel no decorrer de um ciclo de moldação.

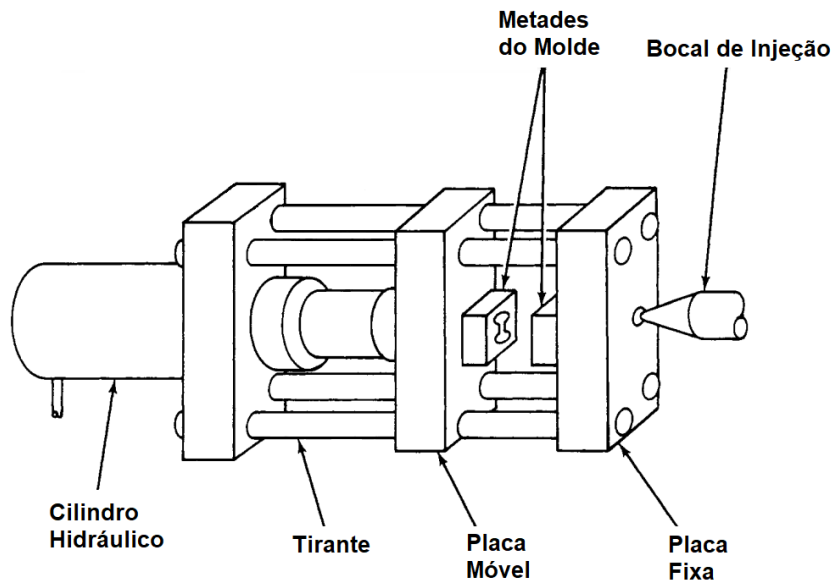


Figura 2.6 – Unidade de aperto hidráulica (adaptado de (Rosato et al., 2000))

### 2.4.3. Molde

O molde é o elemento central do processo de moldagem por injeção, visto que é responsável pela obtenção da geometria final do produto, antes de este ser ejetado e se encontrar apto para desenvolver a função para o qual foi projetado (Bryce, 1998). Cabe a este componente conter o polímero no estado líquido na cavidade do molde, de modo a se dar o enchimento total desta e assim se obter o artigo plástico cuja geometria replica a cavidade moldante (Kazmer, 2007).

Uma segunda função primária do molde é a de possibilitar a solidificação do fundido num intervalo de tempo definido por meio de um arrefecimento controlado, tendo em vista a redução do tempo de arrefecimento, responsável por mais de dois terços do tempo de ciclo, garantindo também uma taxa de arrefecimento uniforme em todo o componente, prevenindo a ocorrência do fenômeno do empeno. De modo a atender a este requisito, o molde deve ser projetado como um permutador de calor, permitindo uma transferência de calor eficiente do fundido, que se encontra a uma temperatura mais elevada, para o molde e deste para o fluido refrigerante que circula nos canais de refrigeração incorporados no molde, assegurando-se que a capacidade de arrefecimento é superior nas zonas de maior espessura do artigo moldado. Além das duas funções já referidas, o molde é também responsável pela ejeção do artigo moldado de maneira rápida e que assegure repetibilidade ao processo, sendo esta ação executada após o molde ser aberto.

As três funções primárias anteriormente descritas - conter o fundido, transferir calor e ejetar o componente - originam requisitos funcionais secundários que devem ser satisfeitos pelo molde de injeção. Como exemplo, a ação de conter o plástico fluidizado no interior da cavidade

molde, exige: um projeto adequado do molde de maneira a resistir aos esforços a que será sujeito; um sistema de alimentação encarregue de escoar o polímero no estado líquido desde o bocal da máquina injetora até à cavidade do molde (Kazmer, 2007).

Um molde de injeção é composto por vários componentes que permitem concretizar as funções requeridas pelo processo de moldagem por injeção (Kazmer, 2007). Apesar da existência de vários tipos de moldes, a configuração mais comum é a de molde de duas placas, assim designada por apresentar apenas duas placas para conter o plástico fundido. Nesta configuração, o molde encontra-se dividido em duas metades ao longo de um plano de separação, que estabelece a divisão entre a metade fixa e móvel do molde, respetivamente designadas de cavidade e bucha.

A metade da cavidade, usualmente denominada de placa A, é responsável por conformar a superfície exterior do componente moldado, pelo que o seu acabamento superficial é determinante na aparência final do artigo. Tipicamente, esta metade contém a bucha de injeção, *sprue bushing*, que estabelece a ligação entre o bocal da máquina injetora e o molde, possibilitando a transferência do polímero fluidizado para o sistema de alimentação inserido no molde. A metade da bucha, designada de placa B, estabelece a configuração interior do componente e integra o sistema de ejeção, utilizado para a extração do artigo do molde por intermédio do avanço de pinos extratores, acionados após se dar a abertura do molde. Os produtos moldados são projetados de maneira a aderir à metade da bucha aquando da abertura do molde, permitindo a atuação do sistema de ejeção e respetiva desmoldagem do componente, como ilustrado na Figura 2.7.

Mediante fixação das metades do molde às placas de suporte integrantes da unidade de aperto, é estabelecida a conexão do molde à máquina injetora.

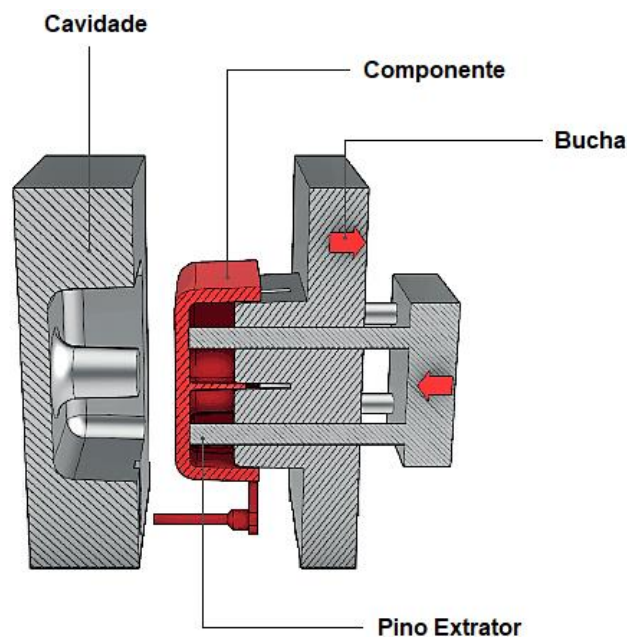


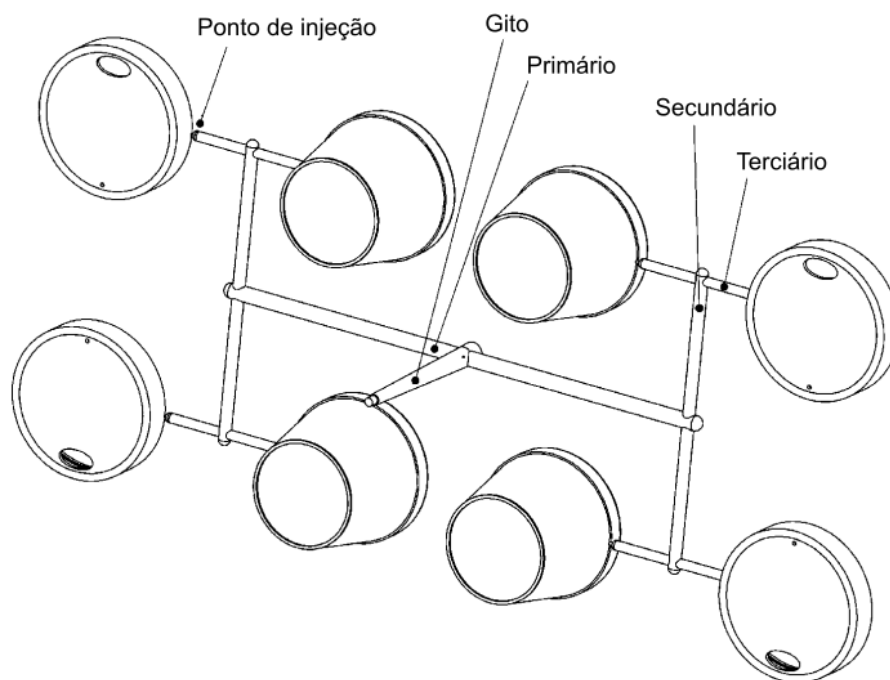
Figura 2.7 – Metades do molde e sistema de extração (adaptado de (Geomiq, 2021))

Após o plástico fundido deixar o bocal da máquina injetora e entrar no molde através da bucha de injeção, este deve ser direcionado para a cavidade do molde e admitido nesta por forma a se obter o produto final (Bryce, 1998). Isto é concretizado através do sistema de alimentação, composto por canais de distribuição maquinados na face do molde, que escoam o polímero desde a bucha de injeção até à cavidade moldante. Estes canais são projetados de modo a gerar uma baixa resistência ao escoamento e a minimizar as perdas de energia por dissipação de calor, sendo a sua secção transversal usualmente de forma trapezoidal ou circular (Kamal et al., 2009).

Na generalidade dos casos, os canais de distribuição são utilizados apenas em moldes de múltiplas cavidades. Em teoria, um molde de cavidade única não necessita de canais de distribuição pois o plástico é injetado diretamente no centro da cavidade, situação essa que é considerada ideal, contudo, alguns moldes de cavidade única podem apresentar a cavidade num local descentrado, requerendo a utilização de canais de distribuição para transportar o material a partir da bucha de injeção até à cavidade (Bryce, 1998).

Localizado no final do sistema de alimentação, o ponto de injeção corresponde à abertura realizada no molde pela qual o polímero fundido entra na cavidade para formar a moldação. A sua principal função é a de conectar o canal de distribuição à cavidade moldante, providenciando um meio através do qual o escoamento do fundido é ajustado em função da localização e geometria do ponto de injeção (Kazmer, 2007).

Na Figura 2.8, é ilustrado um sistema de alimentação projetado para um molde de oito cavidades, no qual são produzidos, respetivamente, oito componentes por cada ciclo de moldação. Neste exemplo de maior complexidade, o sistema de alimentação é composto por uma ramificação de canais de distribuição que asseguram o fornecimento de fundido plástico às cavidades moldantes, podendo ser distinguidos três tipos de canais de distribuição de diâmetro sucessivamente menor, sendo estes: canal de distribuição primário, secundário e terciário. A alimentação dos canais de distribuição é feita através da bucha de injeção, igualmente denominada de gito, que direciona o polímero desde a máquina injetora até ao plano de apartação onde se encontram os respetivos canais.



**Figura 2.8 – Moldação de cavidades múltiplas e sistema de alimentação (adaptado de (Kazmer, 2007))**

Além dos anteriormente descritos, um molde de injeção é composto por outros sistemas que desempenham funções de igual importância, destacando-se o sistema de escape de gases e sistema de guiamento.

O sistema de escape de gases é responsável por evacuar voláteis, umidade e ar, aquando do enchimento da cavidade do molde (Kamal et al., 2009). Um dimensionamento incorreto deste sistema, resulta no aparecimento de vários defeitos geométricos no artigo, causados pela formação de uma bolsa de ar altamente pressurizada na cavidade moldante, através da qual o polímero é impossibilitado de escoar, como também pela combustão do gás na presença do fundido plástico (Kazmer, 2007).

O sistema de guiamento é utilizado de modo a garantir um preciso alinhamento dos componentes móveis e fixos do molde, ciclo após ciclo, permitindo o fabrico de artigos de elevado rigor dimensional que caracterizam o processo.

#### 2.4.4. Unidade de injeção

Como já descrito, a unidade de injeção é concebida para efetuar a plasticização do polímero e a posterior injeção do fundido no molde, devendo esta providenciar uma injeção de material homogéneo, sem a presença de fragmentos de polímero no estado sólido, livre de material degradado e sem gradientes térmicos no fundido (Kamal et al., 2009).

Na Figura 2.9, é representada uma estrutura típica de uma unidade de injeção, formada por um conjunto de elementos capazes de combinar os processos de plasticização e injeção numa

única unidade, os quais incluem: um cilindro revestido exteriormente por bandas de aquecimento, um fuso inserido no interior do cilindro, um motor hidráulico que confere rotação ao fuso, um pistão utilizado para deslocar o fuso aquando da injeção e uma válvula de retenção, situada na extremidade do fuso, que evita o refluxo de material durante a fase de injeção do ciclo.

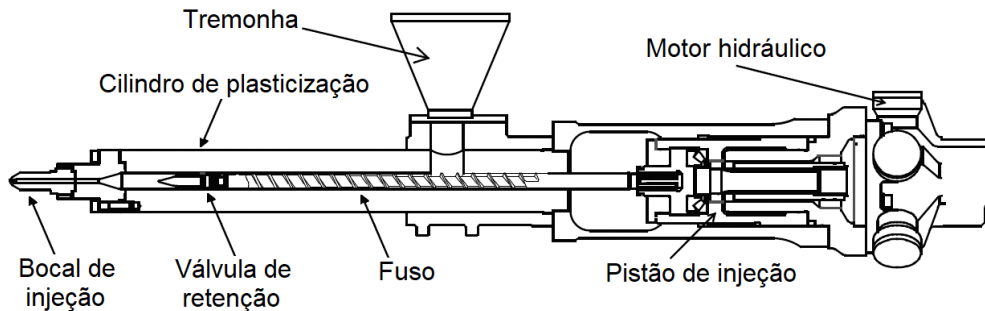


Figura 2.9 – Unidade de injeção (adaptado de (Kamal et al., 2009))

O processo de plasticização inicia-se com a introdução de granulado plástico na tremonha, podendo ser incorporado, adicionalmente, uma mistura de aditivos e corantes a fim de se ajustar as propriedades físicas e aparência final do artigo. Seguidamente, por ação da gravidade, o granulado é direcionado da tremonha para a zona de transporte do fuso, originando o enchimento do canal helicoidal do mesmo. Nesta primeira secção, o coeficiente de atrito entre os pellets e o fuso é um fator determinante na obtenção de um transporte de material adequado para a zona de compressão. Ao atingir a secção intermédia do fuso, o material sofre uma compressão progressiva causada pela redução do volume disponível do canal helicoidal, sendo gerado calor por atrito que em conjunto com o calor emitido pelas bandas de aquecimento provocam a fusão do material plástico. Esta zona é projetada de maneira que o coeficiente de atrito entre o polímero e a parede do cilindro seja superior ao coeficiente de atrito polímero-fuso. Na última secção, zona de dosagem, dá-se a homogeneização do fundido e a sua transferência através da válvula de retenção para a câmara de injeção, situada na frente do fuso. À medida que o material é recolhido na câmara de injeção, o fuso deve retrair para providenciar volume adicional, sendo o material aí contido injetado no ciclo de moldação seguinte.

A Figura 2.10 apresenta as três zonas descritas anteriormente: transporte, compressão e dosagem. Apesar do fuso de plasticização ser projetado para operar numa vasta gama de termoplásticos, idealmente este deve apresentar uma geometria especificamente desenvolvida para o material a injetar, eliminando-se uma possível causa de defeitos nas peças moldadas.

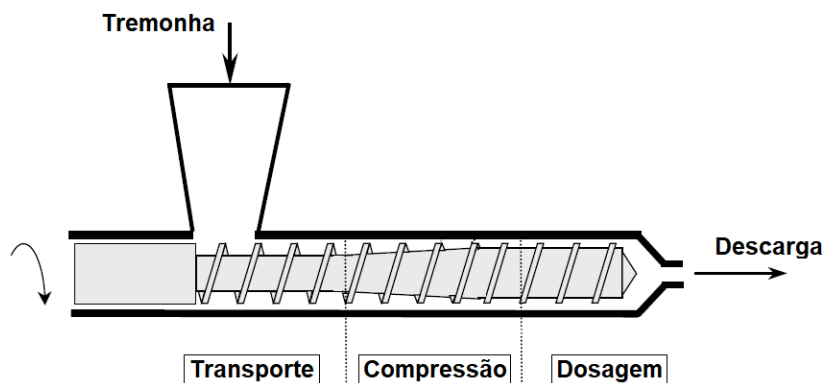


Figura 2.10 – Zonas integrantes do fuso (adaptado de (Kamal et al., 2009))

## 2.5. Polímeros

Sendo a tecnologia de moldagem por injeção utilizada para a produção de artigos plásticos, torna-se apropriado uma breve abordagem à temática dos polímeros, apresentando-se a sua definição e classificação, dando-se maior destaque aos termoplásticos, visto serem o grupo de polímeros mais utilizado na tecnologia de fabrico da presente dissertação.

A origem do termo “polímero” advém das palavras gregas “poly” que significa muitos e “mero” que significa parte. Da sua definição, os polímeros são macromoléculas formadas pela ligação de um elevado número de moléculas de menor dimensão. Estas pequenas moléculas que se combinam entre si para formar as moléculas do polímero são designadas de monómeros, e as reações pelas quais se combinam são designadas de polimerizações. Numa única molécula de polímero, macromolécula, podem existir centenas, milhares ou dezenas de milhares de monómeros ligados entre si (Odian, 2004).

Os polímeros derivados de uma só espécie de monómero são intitulados de homopolímeros, como o caso do polipropileno representado na Figura 2.11, onde a letra  $n$  indica o número de unidades estruturais que se repetem para formar a macromolécula.

Aos polímeros formados por mais de uma espécie de monómero é atribuída a designação de copolímeros, existindo várias categorias destes, cada uma caracterizada por apresentar um arranjo particular das unidades repetitivas ao longo da cadeia polimérica, sendo eles: copolímeros aleatórios; copolímeros alternados; copolímeros em bloco e copolímeros de inserção.

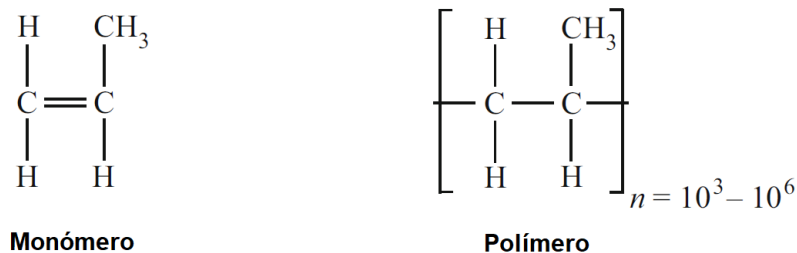


Figura 2.11 – Estrutura do monómero (propileno) e do polímero (polipropileno) (adaptado de (Gedde e Hedenqvist, 2019))

A maneira mais comum de classificar os polímeros é representada na Figura 2.12, onde, em primeira instância, se dá a divisão destes em três grupos: termoplásticos, elastômeros e termoendurecíveis. Os termoplásticos são então decompostos naqueles que apresentam estrutura cristalina e estrutura amorfa. Este método de classificação apresenta uma vantagem em comparação a outros, na medida em que é baseado essencialmente na estrutura molecular dos polímeros (Lovell e Young, 2011).

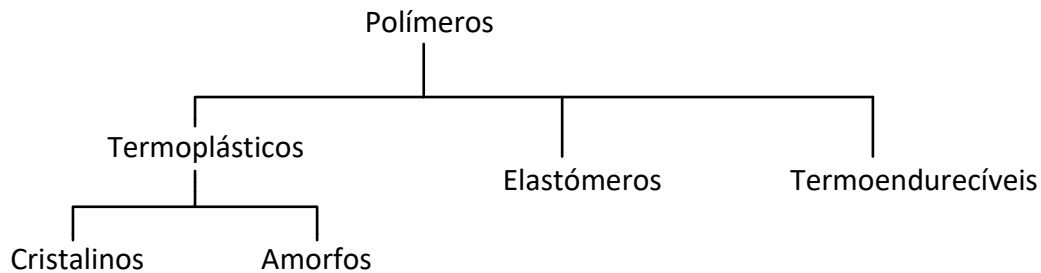


Figura 2.12 – Classificação dos polímeros (adaptado de (Lovell e Young, 2011))

Atendendo à classificação apresentada, os dois grupos de polímeros predominantemente utilizados na técnica de moldagem por injeção correspondem aos termoplásticos e termoendurecíveis, sendo de maior destaque o processamento de artigos termoplásticos.

Os termoplásticos, frequentemente intitulados apenas como plásticos, são polímeros lineares ou ramificados que se tornam líquidos após aplicação de calor (Lovell e Young, 2011). Capazes de suportar vários ciclos térmicos - fusão e posterior solidificação - sem perda significativa das suas propriedades, este grupo de polímeros encontra-se dividido da seguinte forma (Whelan e Goff, 1990):

**Termoplásticos de comodidade** - Caracterizados pelo seu baixo custo de produção e facilidade de processamento, constituem o grupo de plásticos mais utilizados na indústria, sendo integrantes desta classe, materiais como: polipropileno (PP), polietileno (PE), policloreto de vinilo (PVC) e poliestireno (PS);

**Termoplásticos de engenharia** - Definidos por apresentar propriedades mecânicas e térmicas superiores aos de comodidade, são utilizados em aplicações de alto desempenho, onde propriedades como tenacidade, rigidez e resistência química são requeridas. Estes polímeros apresentam também um processamento de maior complexidade, envolvendo temperaturas e pressões mais elevadas. Exemplos de materiais desta classe são: acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), policarbonato (PC) e poliamida (PA);

**Elastômeros termoplásticos** – Formados por materiais que podem ser processados como termoplásticos, mas que exibem um comportamento elástico similar ao da borracha vulcanizada (Drobny, 2014);

**Misturas ou ligas** – Designação atribuída aos materiais constituídos por uma mistura de pelo menos dois termoplásticos, e que podem apresentar propriedades que excedem aquelas dos seus constituintes (Ching et al., 2017).

## 2.6. Camada solidificada

Para uma melhor compreensão do desenvolvimento da camada solidificada na moldagem por injeção, torna-se adequado analisar o tipo de escoamento e mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo.

Na fase inicial de enchimento, assim que as primeiras camadas de polímero contactam com a superfície do molde, que se encontra a uma temperatura mais baixa, dá-se instantaneamente a solidificação das mesmas, enquanto que o núcleo do escoamento permanece na fase líquida. À medida que mais material é injetado, este flui pelo centro do escoamento, deslocando o material previamente existente para as paredes do molde, formando-se uma nova frente de material. Este tipo de escoamento é designado na literatura inglesa de *fountain flow* ou *bubble flow* (Sousa, 2015).

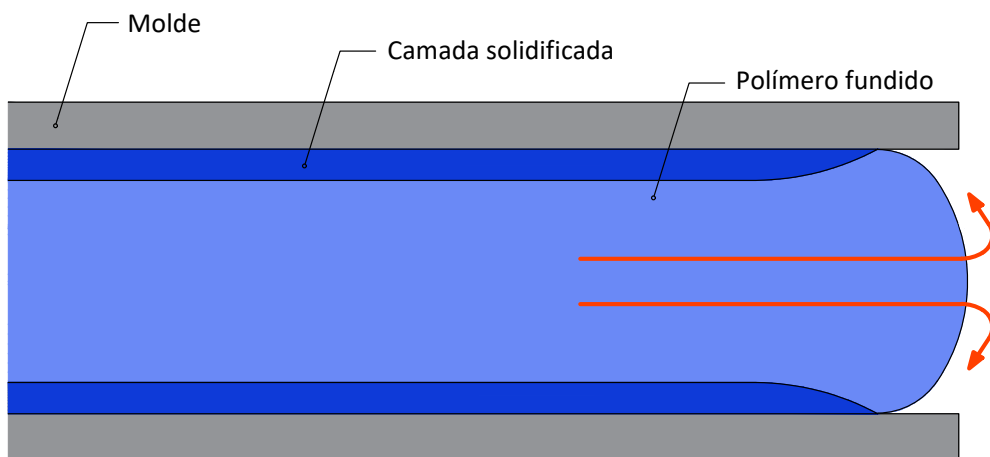


Figura 2.13 – *Fountain Flow*

Como consequência da viscosidade do fluido, as camadas de polímero situadas nas imediações das paredes do molde deslocam-se a uma velocidade inferior relativamente às camadas situadas no centro do escoamento. Deste modo, o material fundido ao escoar continuamente ao longo da cavidade do molde é sujeito a uma taxa de corte elevada, gerando uma grande quantidade de calor por atrito. Tanto o calor proveniente do plástico fundido, como o calor gerado por atrito, são dissipados através da camada solidificada para a parede do molde.

Inicialmente, a camada solidificada é muito fina e o calor é dissipado rapidamente. Com o decorrer do tempo, a espessura da camada solidificada aumenta e o fluxo de calor para o molde diminui, até se atingir uma situação de equilíbrio, na qual o calor dissipado por condução é igual

ao calor introduzido pelo material fundido e pelo calor gerado por atrito. Este estado de equilíbrio é atingido rapidamente, usualmente em décimas de segundo (Sousa, 2015).

## 2.7. Empeno

Apesar do processo de moldagem por injeção ter sido alvo de inúmeros estudos nas últimas décadas, é recorrente, na indústria, o fabrico de componentes com defeitos geométricos. Tal sucede, devido aos inúmeros parâmetros associados ao processo que têm de ser otimizados para a correta conceção de um determinado componente.

Dentro dos defeitos encontrados nas peças obtidas por esta tecnologia, o que suscita maior perplexidade nos profissionais do setor é o fenómeno do empeno, sendo foco de análise nas etapas de projeto do produto, seleção do material, projeto do molde e processamento. Dada a importância que este tema assume em contexto industrial, e sendo este um dos principais impulsionadores para o desenvolvimento da dissertação em questão, torna-se relevante conhecer as causas que levam ao aparecimento do empeno.

O empeno está relacionado com o fenómeno de contração volumétrica do material durante a fase de solidificação, e ocorre sempre que se verifica uma contração não uniforme da peça, ou seja, na situação em que uma direção/área do componente é sujeito a um valor de contração volumétrica diferente de outra direção/área (Fischer, 2012).

Esta contração diferenciada do material, provoca o aparecimento de tensões residuais no componente, que por sua vez levam à flexão ou distorção do mesmo, alterando tanto as suas dimensões como a sua geometria final, como retratado na Figura 2.14. As principais causas que originam uma contração não uniforme do material são atribuídas às seguintes condições (Fischer, 2012) :

- Orientação molecular diferenciada;
- Cristalinidade diferenciada;
- Arrefecimento não uniforme;
- Características do polímero;
- Condições do processo de moldagem.

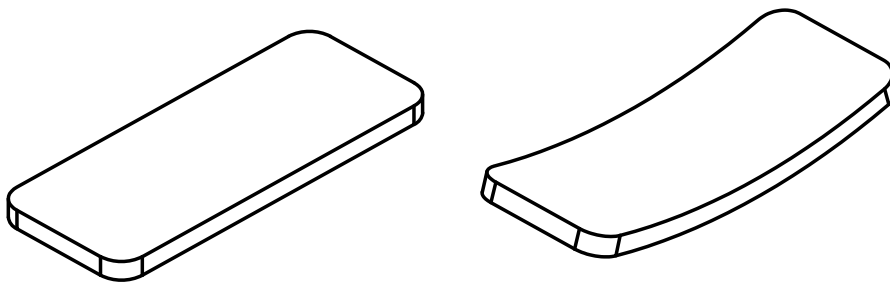
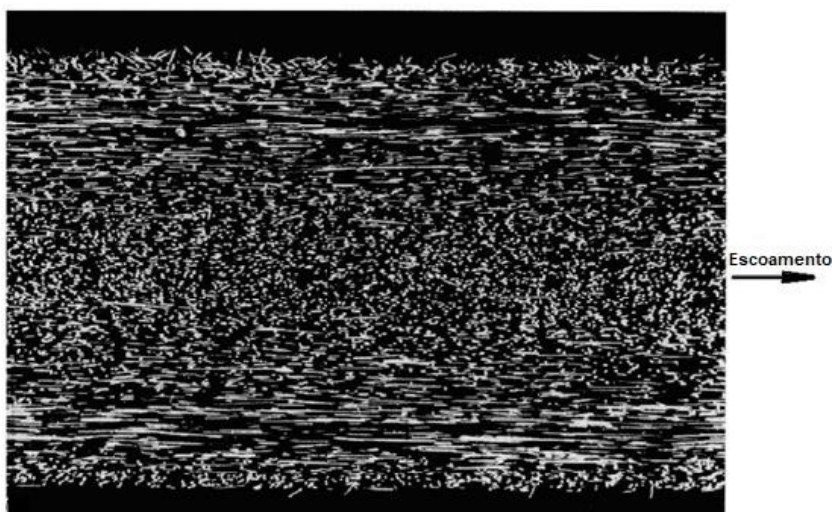


Figura 2.14 – Componente projetado (esquerda) e componente sujeito a empeno (direita)

As tensões residuais nas peças moldadas podem ser originadas devido a dois efeitos: tensões induzidas pelo escoamento e tensões induzidas termicamente. No primeiro caso, o desenvolvimento destas tensões ocorre principalmente durante a fase de injeção, em que o polímero é sujeito a tensões de corte que provocam um alongamento das cadeias moleculares do material segundo a direção do escoamento. A taxa de arrefecimento baixa verificada no núcleo do escoamento, possibilita uma relaxação das cadeias moleculares do polímero, resultando numa orientação molecular reduzida nesta região. Por outro lado, o material localizado junto das paredes do molde sofre uma taxa de arrefecimento elevada, retendo a orientação molecular imposta pelo escoamento, impossibilitando uma completa relaxação das tensões de corte induzidas pelo mesmo. Este processo provoca uma contração anisotrópica do material, podendo causar o empeno do componente.

Na Figura 2.15, é ilustrada uma secção referente a um artigo moldado em polipropileno reforçado com fibra de vidro. Como é possível constatar, as fibras situadas junto à superfície encontram-se predominantemente orientadas segundo a direção do escoamento, ao passo que na região central a sua orientação é aleatória (Fischer, 2012).



**Figura 2.15 – Orientação molecular diferenciada (adaptado de (Fischer, 2012))**

Contudo, a maior contribuição para a formação de tensões residuais nos componentes moldados é atribuída às tensões induzidas termicamente, formadas durante as fases de compactação e arrefecimento, como consequência dos gradientes térmicos presentes durante a solidificação do material. Os elevados gradientes térmicos existentes no produto levam cada ponto de material a solidificar num instante distinto, causando uma contração diferenciada que, por sua vez, origina tensões induzidas termicamente. Visto que as propriedades elásticas e características de relaxação variam significativamente com a temperatura verificada durante a solidificação, estas tensões persistem e permanecem como tensões térmicas residuais (Kamal et al., 2009).

Uma das principais razões para a formação de tensões induzidas termicamente deve-se a um arrefecimento não uniforme, provocado pelas superfícies do molde se encontrarem a temperaturas diferentes. Taxas de arrefecimento mais elevadas, correspondentes a superfícies do molde a temperaturas mais baixas, levam a uma menor contração do material polimérico, tanto de estrutura cristalina como amorfa. Isto é explicado pelo facto dos polímeros cristalinos requererem algum tempo para reorganizar as suas moléculas de modo a formar a estrutura cristalina, pelo que tempos de arrefecimento mais longos permitem uma maior cristalização, levando a uma maior contração. Nos polímeros amorfos, um maior tempo de arrefecimento possibilita uma relaxação de tensões moleculares internas, resultando numa maior densidade do material causada por uma maior contração do mesmo (Fischer, 2012).

Ambos os tipos de tensões residuais anteriormente expostos, são caracterizados por apresentar uma distribuição de tensões singular. As tensões induzidas pelo escoamento tendem a ser de tração e de valor máximo na superfície do componente moldado, como ilustrado na Figura 2.16, em oposição com as tensões puramente térmicas que são de compressão na superfície (Kamal et al., 2009).

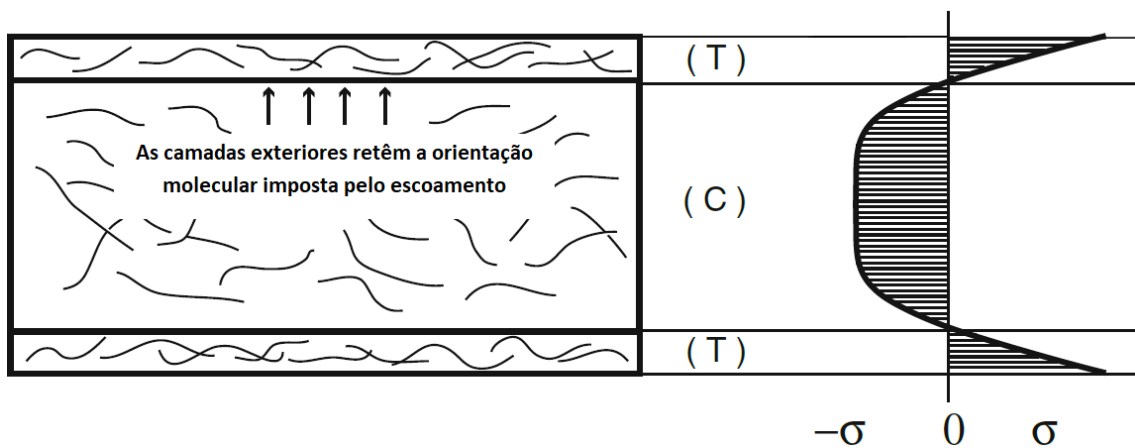


Figura 2.16 – Distribuição de tensões induzidas pelo escoamento (adaptado de (Guevara-Morales e Figueroa-López, 2014))

## Metodologias e Equipamentos

### 3.1. Caso de estudo

A presente dissertação abrange o caso de estudo da fonte linear bidimensional, normal à superfície do molde, em que o material após ser injetado se desenvolve de uma forma radial a partir da fissura por onde é emanado.

Admitindo caudal volúmico constante, uma análise temporal a um volume constante de material, permite concluir que o mesmo evolui no sentido da formação de cascas de espessura sucessivamente mais reduzidas. Inicialmente, um volume de material,  $V_0$ , é injetado na cavidade do molde. Após decorrido um intervalo de tempo,  $t$ , correspondente ao tempo de injeção de um mesmo volume de material equivalente a  $V_0$ , forma-se a casca de material 1, sendo o mesmo raciocínio aplicado para a formação de cascas de material posteriores.

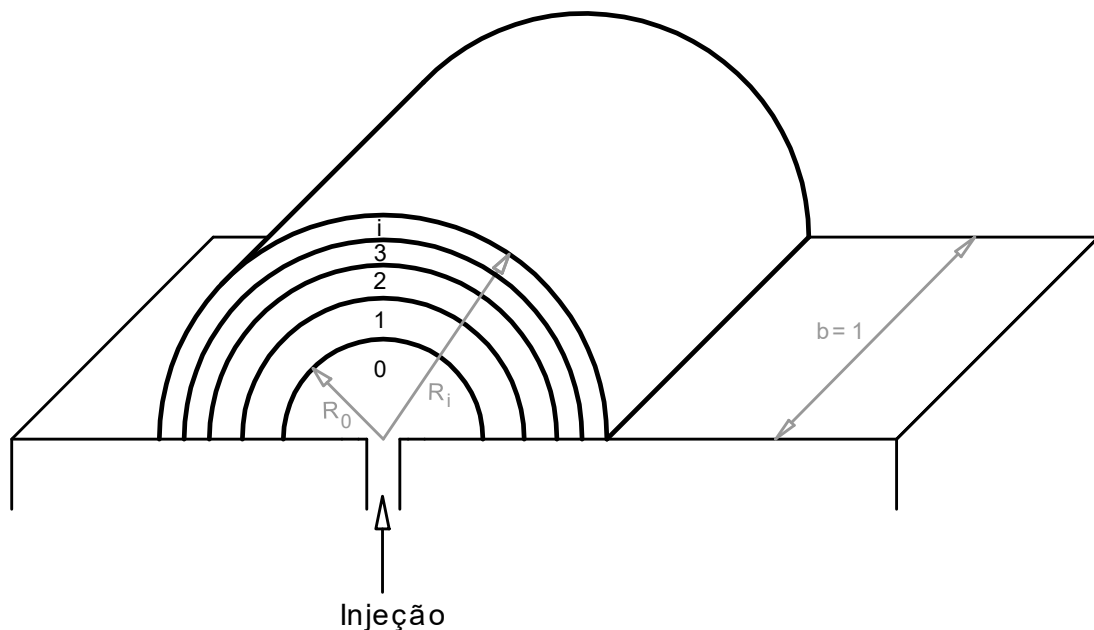


Figura 3.1 – Fonte linear bidimensional

O tempo de formação de cada casca é constante e obtido mediante:

$$t = \frac{V_0}{Q_V} = \frac{\pi R_0^2}{2Q_V} \quad (3.1)$$

Onde  $R_0$  representa o raio do semicilindro formado pelo volume inicial e  $Q_V$  o caudal volúmico de injeção. Sendo a definição de um  $R_0$  equivalente a estabelecer um volume inicial de matéria a ser estudada ao longo do tempo.

Para o cálculo da espessura das cascas, começa-se por aplicar o conceito de conservação da massa, sendo o problema resolvido por unidade de largura ( $b=1$ ):

$$m_i = m_0 \quad (3.2)$$

Onde  $m_i$  representa a massa de uma casca genérica  $i$  e  $m_0$  a massa contida no volume  $V_0$ .

Para a situação de massa volúmica constante, a Equação (3.2) resulta em:

$$R_i = \sqrt{R_0^2 + R_{i-1}^2} \quad (3.3)$$

Onde  $R_i$  representa o raio exterior da casca genérica  $i$ ;  $R_0$  o raio do semicilindro formado pelo volume inicial e  $R_{i-1}$  o raio interior da casca genérica  $i$ .

Por fim, a obtenção da espessura de uma casca de material é efetuada através de:

$$e_i = R_i - R_{i-1} \quad (3.4)$$

Sendo o cálculo realizado das cascas mais interiores para as cascas mais exteriores, ou seja, com início na primeira casca de material.

Dado que a espessura das cascas vai diminuindo e o seu tempo de formação é o mesmo, é possível concluir que a velocidade do material decresce à medida que se desenvolve pelo campo de escoamento.

No caso a ser desenvolvido na dissertação, será considerado que a zona do molde sujeita a arrefecimento se encontra a uma distância  $d$  da zona de injeção, considerada adequada para anular os efeitos bidimensionais que se verificam junto da região por onde o material é emanado, como clarificado na Figura 3.2. Deste modo, o escoamento será reduzido ao caso quasi-bidimensional, no sentido em que o escoamento se desenvolve segundo a direção  $x$ , embora sejam incorporadas pequenas deslocações segundo  $y$  a fim de se atender à redução de área causada pela solidificação do material junto da parede.

Por último, evidencia-se o facto do modelo desenvolvido não contabilizar efeitos viscosos, pelo que não existirá desenvolvimento de camada limite adjacente à parede do molde. Tal desvio face à realidade é abordado no estudo de Cardoso (2019), no qual é revelado que se consegue uma razoável primeira aproximação do escoamento desprezando os efeitos viscosos.

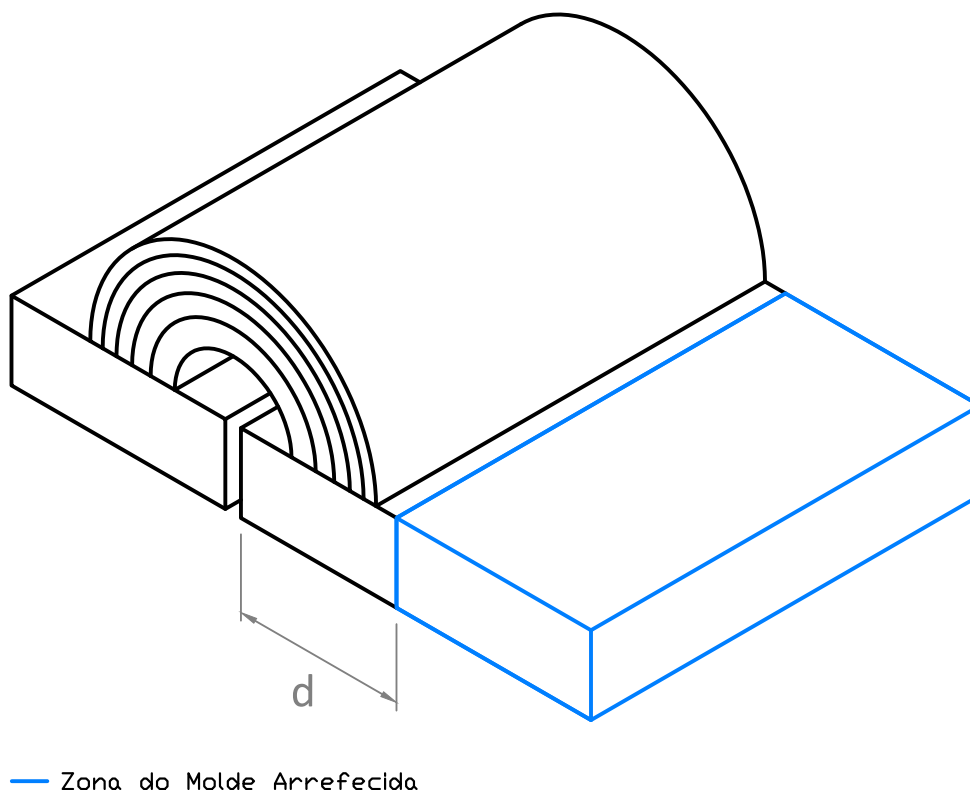


Figura 3.2 – Zona do molde considerada para o estudo

### 3.2. Síntese de imagens

Neste subcapítulo abordar-se-á as metodologias utilizadas na produção das imagens sintetizadas, referentes ao processo de escoamento, com solidificação, de um fluido com partículas dispersas. Antes de se proceder à apresentação das referidas metodologias, é realizada uma pequena explicação à síntese de imagens e ao software utilizado na concretização das mesmas.

O termo sintetizar traduz o ato de tornar sintético, ou seja artificial. Assim, a síntese de imagens descreve o processo de geração de imagens artificiais a partir de modelos matemáticos que regem certos fenómenos físicos, recorrendo-se à utilização de softwares em que são implementados os algoritmos concebidos.

No trabalho em questão, a ferramenta computacional utilizada para implementar o algoritmo desenvolvido foi o software *GNU Octave*. Este software apresenta uma linguagem computacional especialmente desenvolvida para cálculo numérico, bastante similar à utilizada no software *MATLAB*, abreviatura de *matrix laboratory*, que como o próprio nome indica, reflete a sua notável capacidade em efetuar operações com matrizes. Caracterizada pela sua simplicidade, a linguagem de programação utilizada pelo *Matlab* é designada de código-M e resulta de uma combinação de linguagens como *C*, *Fortran* e *Java*.

O software descrito anteriormente foi utilizado num computador provido de um processador Intel® Core™ i7-8550U com uma frequência máxima de 4.00 GHz.

### 3.2.1. Domínio de estudo

Numa montagem experimental, o domínio de estudo compreende a área delimitada pela janela de observação incorporada numa das faces do molde, que possibilita a visualização do interior da cavidade moldante durante a fase de enchimento. Deste modo, de forma a replicar uma futura montagem experimental, o domínio de estudo considerado para o caso numérico foi estabelecido como tendo uma geometria retangular e as suas dimensões foram definidas como variáveis  $L_x$  e  $L_y$ , designando respetivamente a dimensão horizontal e vertical do retângulo.

Concluída a delimitação do domínio, procedeu-se à sua discretização em elementos quadráticos de igual dimensão. O resultado deste processo foi a geração de uma malha uniforme, cuja dimensão do lado dos seus elementos é modificável e estabelecida através da variável  $b$ . Na Figura 3.3, é ilustrado o domínio discretizado, sendo cada célula da malha representativa de um píxel da imagem sintetizada, em que o termo píxel designa o menor elemento de uma imagem digital ao qual é possível atribuir uma cor.

Dado que a dimensão das células da malha pode ser ajustada, é possível definir uma certa resolução para a imagem gerada, quantificada pela medida *ppi*, do inglês *pixels per inch*, associada à densidade de píxeis de uma imagem digital. Esta medida de resolução digital indica o número de píxeis existentes por unidade de comprimento, neste caso por polegada, segundo a direção horizontal ou vertical numa imagem apresentada num ecrã. Visto que os píxeis são de geometria tipicamente quadrada, a densidade horizontal e vertical é igual.

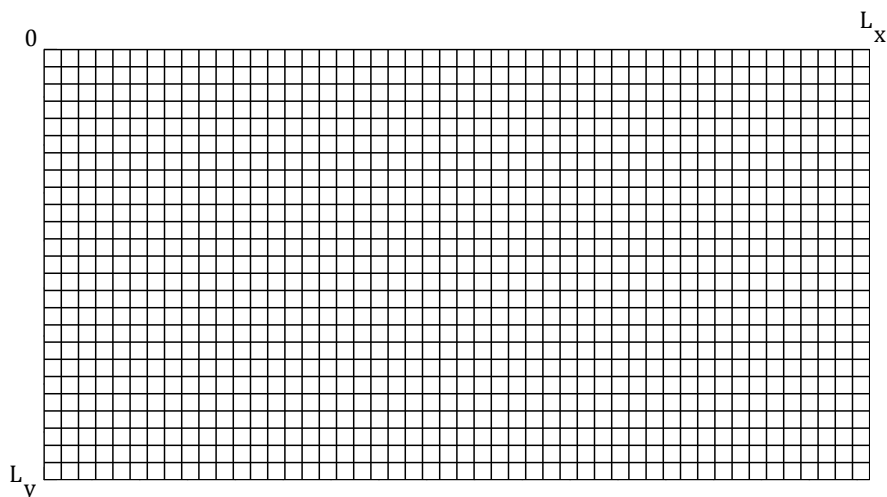


Figura 3.3 – Discretização do domínio em elementos quadráticos de lado  $b$

Posteriormente à geração da malha foi criada uma matriz,  $C_{m \times n}$ , usada para controlar a cor dos píxeis constituintes do domínio. Esta matriz, designada de matriz de píxel, é uma réplica da malha na medida em cada elemento da matriz equivale a uma célula da malha, pelo que o seu

número de linhas e colunas é, respetivamente, igual ao número de divisões da malha segundo a direção vertical e horizontal:

$$\begin{cases} m \cong \frac{L_y}{b} \\ n \cong \frac{L_x}{b} \end{cases} \quad (3.5)$$

Através da atribuição de um número a cada elemento da matriz é definida a cor do píxel relativa a esse elemento. No caso, a cor branca foi selecionada como cor de fundo das imagens sintetizadas, tendo-se igualado a 1 todos os elementos da matriz, visto ser o número associado à cor pretendida, tal como exemplificado na Figura 3.4.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

**Figura 3.4 – Matriz de píxel**

Recorrendo-se à matriz gerada e ao plano cartesiano, as coordenadas de um píxel podem ser apresentadas de duas formas: em coordenadas de píxel, expressas em unidades de píxel e referentes aos índices de linha e coluna da matriz  $C$ ; ou em coordenadas cartesianas, expressas em unidades de comprimento e referentes ao sistema de coordenadas cartesiano com origem arbitrada no vértice superior esquerdo do domínio.

### 3.2.2. Partículas

Já com o domínio definido e discretizado, o próximo passo foi popular o mesmo com  $N$  partículas, de dimensão e em concentração adequadas, em posições arbitrárias. Para tal, numa primeira fase foi escolhido o método de introdução das partículas no domínio de forma a garantir aleatoriedade ao processo, tendo-se optado pela função `rand` do *Octave*, capaz de gerar números aleatórios extraídos a partir duma distribuição normal. Deste modo, foram gerados valores aleatórios para as coordenadas  $x$  e  $y$  de cada partícula a partir dos intervalos  $[0, L_x]$  e  $[0, L_y]$ , valores esses que foram armazenados numa matriz,  $D$ , do tipo  $N \times 2$ , em que cada linha apresenta as duas coordenadas de uma partícula em unidades de comprimento.

Apesar da utilização do termo aleatório, estes números são designados, corretamente, de pseudo-aleatórios. Tal distinção é feita, uma vez que os algoritmos numéricos capazes de gerar

sequências aleatórias são, por definição, completamente determinísticos e nunca podem, portanto, produzir um efeito aleatório de qualquer tipo (Casquilho, 2007). Assim, os algoritmos implementados num programa de computador apenas podem gerar sequências de números pseudo-aleatórios, gerados com base numa determinada distribuição e tendo por valor inicial uma dada semente. Posto isto, a única diferença inevitável entre uma sequência aleatória e uma pseudo-aleatória reside no facto que esta última se pode repetir, sendo convencional o uso de uma terminologia que ignora esta diferenciação (Casquilho, 2007) .

Embora a atribuição de coordenadas às partículas se encontre armazenada na matriz  $D$ , torna-se imprescindível proceder a uma conversão de coordenadas cartesianas para coordenadas de píxel sempre que se pretenda representar as partículas no domínio. Esta conversão possibilita a manipulação dos elementos da matriz de píxel que apresentam coordenadas cartesianas equivalentes às arbitradas para as partículas. Para tal, foi criada uma matriz,  $A$ , com as coordenadas das partículas em unidades de píxel, obtida através do produto da matriz  $D$  pelo inverso da dimensão do lado de cada píxel, sendo o resultado arredondado às unidades:

$$A \cong D \times b^{-1} \quad (3.6)$$

Desta operação resulta a obtenção de uma matriz composta de números inteiros, também ela do tipo  $N \times 2$ , em que em cada linha é exibida as coordenadas de uma partícula segundo os índices de linha e coluna da matriz de píxel, indicando, portanto, os elementos onde serão representadas as partículas. Uma breve análise às matrizes  $D$  e  $A$  permite aferir que a primeira e segunda coluna de ambas dizem respeito, respetivamente, à coordenada vertical e horizontal das partículas segundo o sistema de coordenadas associado a essa matriz.

$$D = \begin{bmatrix} y_1 & x_1 \\ y_2 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ y_N & x_N \end{bmatrix} \xrightarrow{\times b^{-1}} A = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 \\ i_2 & j_2 \\ \vdots & \vdots \\ i_N & j_N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Com as coordenadas das partículas estabelecidas, a etapa seguinte consistiu na representação das partículas no domínio, tendo-se cumprido os seguintes critérios:

- 1) Cada partícula foi representada por meio de quatro píxeis, isto é, através do preenchimento de quatro células da malha agrupadas de modo a formar um quadrado. Para tal, numa primeira fase procedeu-se à representação das partículas por meio de um píxel, fazendo uso das coordenadas armazenadas na matriz  $A$ . Seguidamente, avançou-se para uma representação a quatro píxeis, em que as coordenadas de cada píxel inicial foram ajustadas para o lado de maneira a configurar um quadrado, resultando na geração de mais três coordenadas por cada coordenada contida na matriz  $A$ ;

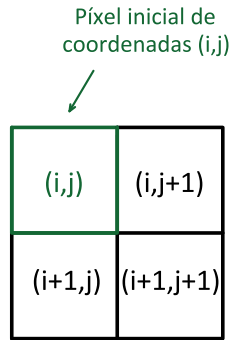


Figura 3.5 – Disposição geométrica dos quatro píxeis constituintes de uma partícula

- 2) As cores dos quatro píxeis foram atribuídas de maneira aleatória, segundo uma escala de cinzento, sendo gerado um número aleatório no intervalo  $[0,1]$  para cada um dos quatro píxeis constituintes da partícula, em que a cor preta foi associada ao número 0 e a cor branca ao número 1. Por sua vez, este método foi aplicado individualmente a todas as  $N$  partículas, resultando na geração de partículas de aparência diferenciada, transmitindo-se também a ideia que o domínio é populado por partículas de menor e maior dimensão, como expectável de se captar num registo fotográfico real;

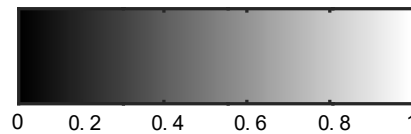


Figura 3.6 – Escala de cinzento

- 3) Os números aleatórios, relativos às cores das partículas, foram armazenados numa matriz tridimensional formada por uma extensão de matrizes do tipo  $2 \times 2$  que se repetem ao longo de uma terceira dimensão. Deste modo, cada elemento da matriz tridimensional é definido por meio de três índices  $(i, j, k)$ , em que  $i$  e  $j$  definem a localização de um dos quatro píxeis de uma dada partícula  $k$ . Subentendesse, portanto, que cada matriz  $2 \times 2$  é representativa de uma partícula e os seus elementos definem a cor dos píxeis dessa mesma partícula. Consequentemente, o número de matrizes criadas iguala o número de partículas introduzidas no domínio.

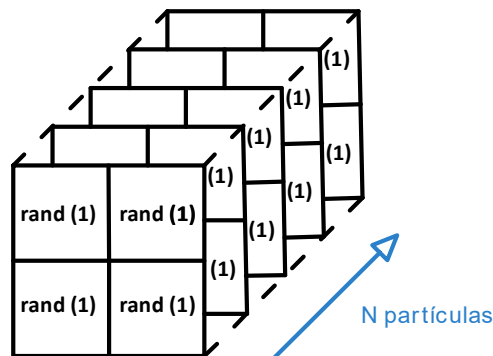


Figura 3.7 – Matriz tridimensional utilizada para armazenar as cores de cada partícula

Por fim, os valores contidos nas matrizes  $2 \times 2$ , referentes às cores dos píxeis de cada partícula, foram introduzidos na matriz de píxel, concluindo-se a representação das partículas no domínio. O resultado deste processo é a produção de uma imagem que retrata o campo de partículas no instante inicial.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	0.6	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.8 – Representação de uma partícula na matriz de píxel

Ainda referente a este tópico, é pertinente explicitar que caso duas partículas venham a ocupar exatamente as mesmas coordenadas, é representada a partícula que por último é introduzida no domínio, correspondente à partícula cujas coordenadas se encontram armazenadas num maior índice de linha da matriz  $A$ . Conclui-se, deste modo, que o código gere essa situação de forma natural, embora isso implique um desvio face à realidade, visto que nunca será replicada uma eventual colisão de partículas provocada por estas virem a apresentar movimento relativo entre si, existindo unicamente uma sobreposição de partículas. Esta sobreposição pode ser interpretada no sentido em que embora as partículas apresentem as mesmas coordenadas no plano cartesiano, no espaço estas podem diferir em função da terceira dimensão introduzida, isto é, as partículas podem não estar contidas no mesmo plano vertical paralelo ao escoamento, nunca se dando, portanto, a sua colisão.

### 3.2.3. Sequência temporal de imagens

Concluída a etapa de popular o domínio com  $N$  partículas em posições arbitrárias, o próximo passo consistiu na transição de uma imagem estática para uma que varia no tempo. Para esse fim, o campo de partículas foi animado de movimento de translação, exibido através de uma sequência temporal de imagens, nas quais as partículas apresentam um dado deslocamento manifestado de imagem para imagem, sendo as imagens geradas em instantes de tempo sucessivos e com um passo de tempo constante entre elas. Esta translação imposta às partículas, pretendeu reproduzir o escoamento de um fluido com partículas dispersas referente ao caso de estudo retratado no início do presente capítulo, tratando-se, pois, de um escoamento que pode ser aproximado ao caso unidimensional e descrito em função do movimento das partículas.

Posto isto, esta fase do trabalho iniciou-se com a definição de novas variáveis consideradas fundamentais na produção de uma sequência temporal de imagens, sendo elas:

- $fps$  → Número de imagens geradas por segundo, *frames per second*;
- $\Delta_t$  → Passo de tempo, em segundos, entre imagens;
- $T_S$  → Tempo de simulação, em segundos;
- $N_f$  → Número de imagens geradas;

A relação entre estas variáveis é expressa por:

$$\Delta_t = fps^{-1} \quad (3.8)$$

$$N_f = fps \cdot T_S \quad (3.9)$$

Visto ser mais intuitivo para o utilizador definir a variável  $fps$  ao invés da variável  $\Delta_t$ , esta última foi expressa em função de  $fps$  por meio da Equação (3.8). Salienta-se também o facto de serem produzidas  $N_f + 1$  imagens, onde é somada a  $N_f$  a imagem correspondente ao campo de partículas no instante inicial.

Após a definição das variáveis anteriores, seguiu-se a etapa de conferir movimento às partículas. Para esse fim, foi estabelecido um vetor velocidade,  $\vec{V}$ , a ser aplicado a todas as partículas, definido através das suas duas componentes:  $\vec{V}_x$  e  $\vec{V}_y$ . Assim, partindo-se das coordenadas cartesianas das partículas no instante inicial, armazenadas na matriz  $D$ , procedeu-se à sua atualização de passo de tempo para passo de tempo, num total de  $N_f$  vezes, por intermédio das equações cinemáticas:

$$\begin{cases} x(t_2) = x(t_1) + V_x \Delta_t \\ y(t_2) = y(t_1) + V_y \Delta_t \end{cases} \quad (3.10)$$

Em que  $t_1$  e  $t_2$  representam dois instantes de tempo sucessivos, espaçados de  $\Delta_t$  segundos:

$$t_2 = t_1 + \Delta_t \quad (3.11)$$

Como se pode observar na Figura 3.9, a atualização da matriz  $D$  foi acompanhada de uma atualização da matriz  $A$  para cada passo de tempo. Desta forma, após aplicadas as equações cinemáticas às coordenadas cartesianas das partículas, procedeu-se à sua conversão para coordenadas de píxel. Depreende-se, então, que por cada passo de tempo são geradas matrizes  $D$  e  $A$ , em que a matriz  $D$  transita para o passo de tempo seguinte, onde lhe é somada o deslocamento efetuado pelas partículas entre os instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , posteriormente obtendo-se a matriz  $A$  a partir de  $D$ .

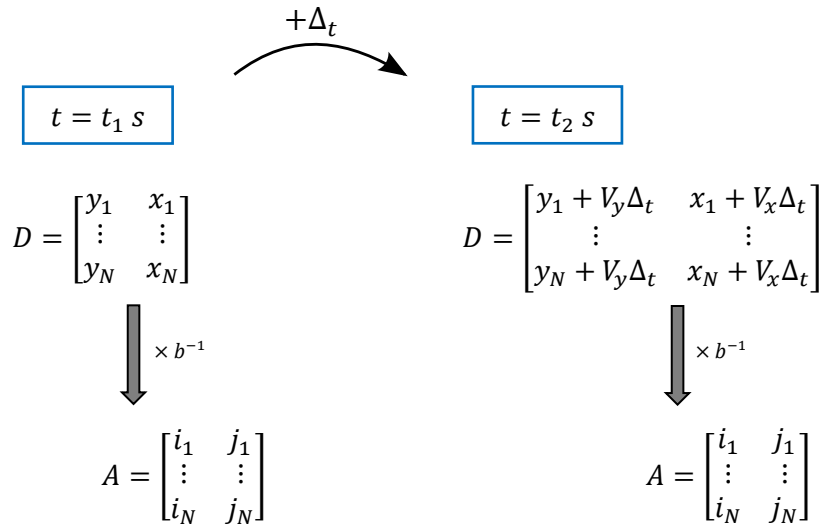


Figura 3.9 – Atualização das matrizes  $D$  e  $A$  para cada passo de tempo

Dispondo-se das coordenadas das partículas, em unidades de píxel, para cada passo de tempo, a sua reintrodução no domínio foi efetuada através da associação entre as cores definidas para cada partícula, armazenadas na matriz tridimensional, e as respetivas coordenadas relativas a um dado instante de tempo. Assim, a matriz de píxel foi atualizada de tal forma que as partículas foram apenas deslocadas em cada passo de tempo, sem que as cores dos seus píxeis fosse alterada, tornando-se necessário apagar o campo de partículas na transição para o passo de tempo seguinte, a fim de ser evitada uma sobreposição de campos de partículas alusivos a instantes de tempo anteriores.

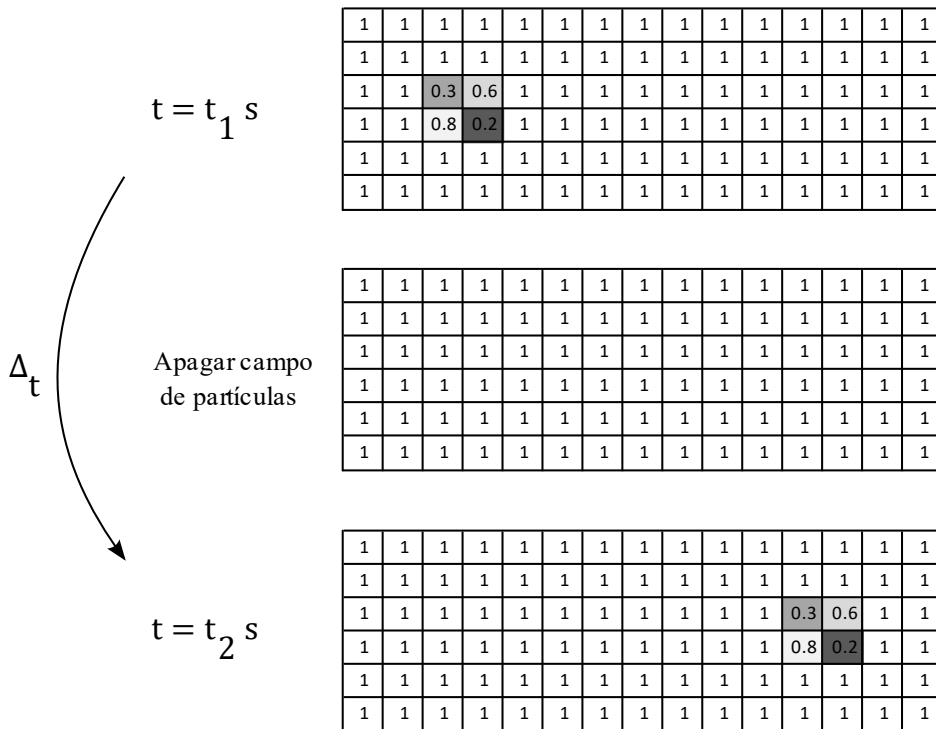


Figura 3.10 – Atualização da matriz de píxel para cada passo de tempo

### 3.2.4. Perturbação de velocidade

A seguinte etapa do trabalho consistiu na adição de uma pequena perturbação de velocidade às partículas, com o propósito de se conferir um carácter turbulento ao escoamento, aproximando o comportamento das partículas ao que se espera verificar num escoamento real. Dada a natureza irregular e aleatória pela qual é caracterizada a turbulência, a perturbação de velocidade foi introduzida de modo a gerar flutuações aleatórias da velocidade de cada partícula em cada passo de tempo. Em outros termos, a velocidade será diferente de partícula para partícula e de passo de tempo para passo de tempo, em oposição com o campo de velocidades apresentando até então, em que a velocidade das partículas era igual e constante ao longo do tempo.

As flutuações aleatórias de velocidade foram aplicadas às duas componentes do vetor velocidade, atribuindo-se a nomenclatura  $pv_x$  e  $pv_y$  às flutuações em torno de  $V_x$  e  $V_y$ . Resulta, deste modo, que as componentes horizontal e vertical da velocidade de uma partícula, num determinado instante de tempo, são obtidas mediante:

$$\begin{cases} u(t) = V_x + pv_x \\ v(t) = V_y + pv_y \end{cases} \quad (3.12)$$

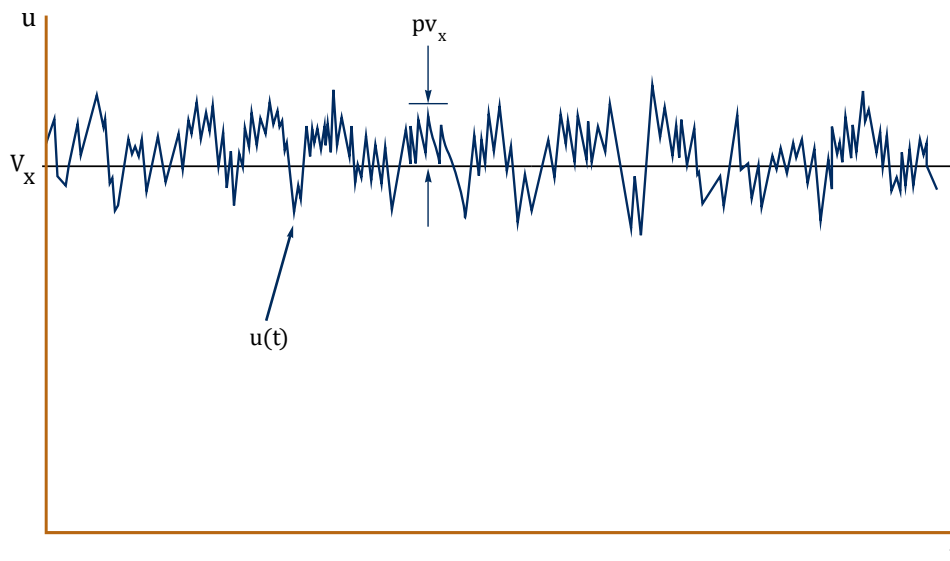


Figura 3.11 – Flutuações aleatórias de velocidade em torno de  $V_x$  (adaptado de (Munson et al., 2013))

As perturbações introduzidas são no máximo de um valor relativo  $pm$ , definido pelo utilizador, e dadas por (Vaz, 2021a):

$$\begin{cases} pv_x = V_x \cdot pm \cdot \text{rand}([-1,1]) \\ pv_y = V_y \cdot pm \cdot \text{rand}([-1,1]) \end{cases} \quad (3.13)$$

Assim, para cada passo de tempo é gerado um par de valores  $(pv_x, pv_y)$  por partícula, diferente de partícula para partícula por meio da utilização do termo  $\text{rand}([-1,1])$ . A inclusão deste termo nas equações permite a geração de um número aleatório no intervalo  $[-1,1]$ , que

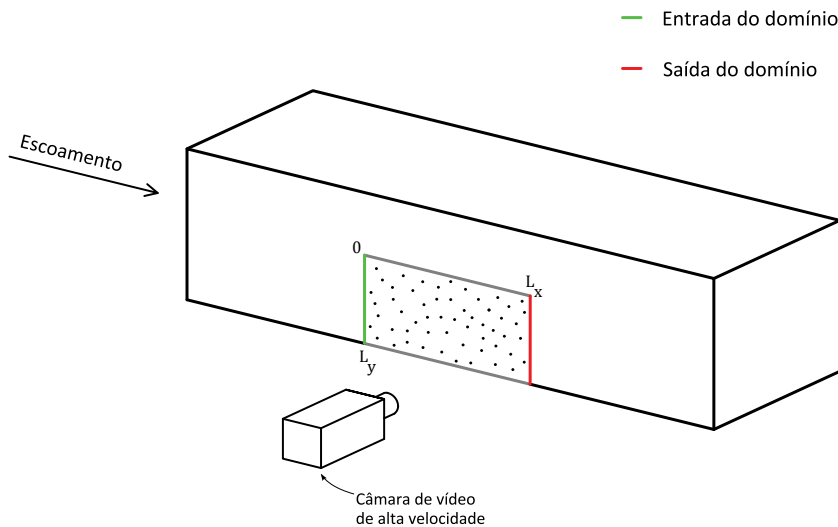
quando multiplicado a  $V_x \cdot pm$  assegura uma aleatoriedade das perturbações atribuídas a cada partícula.

Por último, a atualização das coordenadas das partículas, em cada passo de tempo, é feita de maneira análoga à apresentada no subcapítulo 3.2.3, diferindo apenas na inclusão da perturbação de velocidade:

$$D = \begin{bmatrix} y_1 + (V_y + pv_{y_1})\Delta_t & x_1 + (V_x + pv_{x_1})\Delta_t \\ \vdots & \vdots \\ y_N + (V_y + pv_{y_N})\Delta_t & x_N + (V_x + pv_{x_N})\Delta_t \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.2.5. Entrada e saída de partículas do domínio

Derivado da translação imposta às partículas, estas podem abandonar o domínio de estudo de maneira idêntica à que seria observada numa montagem experimental, em que pela janela de observação é visualizado um escoamento contínuo de partículas a entrar e a sair do campo de visão, como esboçado na Figura 3.12. Visto que o escoamento se desenvolve apenas segundo a direção  $x$ , e atendendo ao sentido arbitrado para o mesmo, as partículas saem pelo limite direito da janela de observação e novas partículas entram pelo limite esquerdo, sendo o processo replicado na produção das imagens sintetizadas.



**Figura 3.12 – Esquema da entrada e saída de partículas do domínio de estudo definido numa montagem experimental**

Torna-se, pois, evidente que a obtenção de um escoamento contínuo de partículas é apenas exequível caso se proceda a um controlo das partículas que entram e saem do domínio. Como tal, foram satisfeitos os seguintes critérios:

- 1) A saída das partículas do domínio dá-se quando a sua coordenada horizontal excede a dimensão horizontal do mesmo:

$$x > L_x \quad (3.15)$$

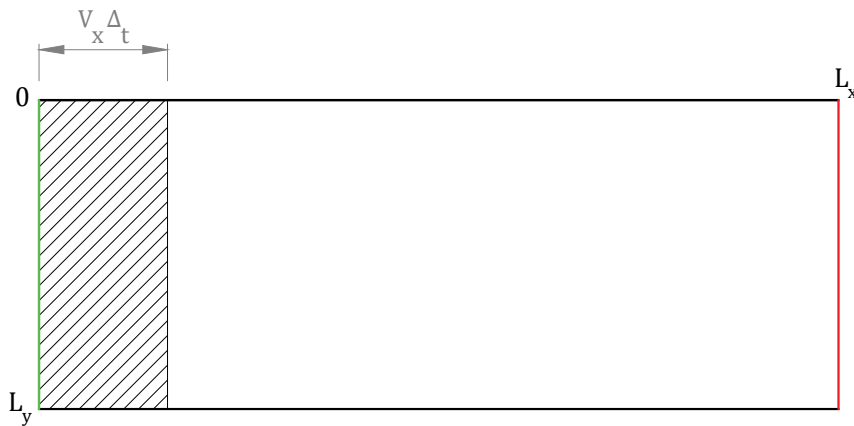
Deste modo, a posição inicial das partículas, dimensão horizontal do domínio, tempo de simulação e velocidade arbitrada são parâmetros que ditam se as partículas permanecem no domínio até à conclusão da simulação;

- 2) O número de partículas que entra no domínio é igual ao número de partículas que sai do domínio para cada passo de tempo:

$$n_{in} = n_{out} \quad (3.16)$$

Isto traduz-se numa conservação do número total de partículas contidas no domínio, inicialmente definido por meio da variável  $N$ ;

- 3) As partículas que entram no domínio apresentam uma aparência diferente das partículas que saem, isto é, não há qualquer tipo de relação entre as cores dos píxeis de ambas;
- 4) Às novas partículas são atribuídas coordenadas aleatórias, inseridas no intervalo de valores compreendido pela área a tracejado demonstrada na Figura 3.13. Pode-se constatar que no instante da sua entrada no domínio, as novas partículas podem apresentar uma coordenada horizontal máxima dada por  $V_x \Delta_t$ , justificada por retratar o deslocamento das partículas que se encontram na iminência de entrar no domínio no passo de tempo anterior.



**Figura 3.13 – Área de introdução de novas partículas no domínio identificada a tracejado**

Em termos numéricos, a implementação dos critérios anteriores iniciou-se pela identificação das partículas que para cada passo de tempo excediam o limite direito do domínio após atualizada as suas coordenadas. Identificadas as partículas, as suas coordenadas foram alteradas de acordo com o critério 4, sendo também modificadas as cores dos seus píxeis. Deste processo, resulta a eliminação das partículas que deixam o domínio e a geração de um igual número de novas partículas a entrar no domínio, simplesmente por manipulação das matrizes associadas às coordenadas e cores das partículas.

Para se finalizar este tópico, adverte-se o leitor para a situação em que a componente vertical da velocidade das partículas não é nula. Neste caso, e atendendo ao facto do limite inferior do domínio coincidir com uma fronteira impermeável, referente à superfície do molde onde será captada a formação da camada solidificada, as partículas poderão abandonar o domínio pelo limite lateral deste, como já antes visto para o caso unidimensional, como também pelo topo do domínio. Nesta circunstância, o código foi desenvolvido para lidar de maneira idêntica à situação unidimensional, sendo às partículas que deixem o domínio pelo limite superior aplicada a metodologia anteriormente exposta, verificando-se a entrada de uma nova partícula pelo limite esquerdo do domínio por cada partícula que sai pelo seu limite superior.

### 3.2.6. Limitação do passo de tempo

A geração de um campo de partículas em movimento, em que há uma entrada e saída contínua de partículas do domínio, levanta um outro problema que se prende com a dificuldade em seguir-se individualmente as partículas de imagem para imagem, devido ao deslocamento excessivo que pode ser verificado em cada passo de tempo. Deste modo, com a finalidade de facilitar-se a identificação das partículas em cada passo de tempo, o passo espacial,  $\Delta_S$ , foi limitado de maneira a não ser superior ao valor da figura de mérito, ou distância característica entre partículas  $L^*$ :

$$\Delta_S = V\Delta_t \quad (3.17)$$

$$\Delta_S < L^* \quad (3.18)$$

A metodologia anterior equivale a definir um  $\Delta_t$  máximo a ser usado na simulação em função da figura de mérito e da velocidade:

$$\Delta_t < \frac{L^*}{V} \quad (3.19)$$

Onde  $L^*$  é obtido em função das dimensões do domínio e do número de partículas contidas neste através de (Vaz, 2021b):

$$L^* = \sqrt{\frac{4L_xL_y}{3^{3/2}N}} \approx \sqrt{\frac{L_xL_y}{1,3N}} \quad (3.20)$$

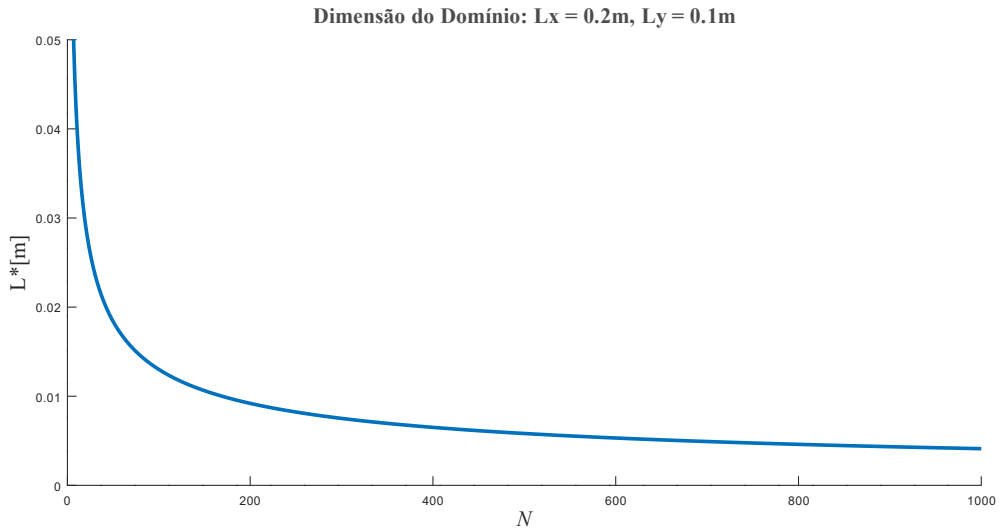
Pelo que a Inequação (3.19) resulta em:

$$\Delta_t < \sqrt{\frac{L_xL_y}{1,3N(V_x^2 + V_y^2)}} \quad (3.21)$$

Esta última inequação define o passo de tempo máximo que pode ser utilizado de maneira ao deslocamento das partículas permanecer inferior à distância típica entre estas em cada passo

de tempo. Intrinsecamente à definição de um passo de tempo máximo é estabelecido um valor mínimo para a variável  $fps$  correspondente ao inverso de  $\Delta_t$ .

Dada a importância que a figura de mérito assume na limitação do passo de tempo, torna-se apropriado apresentar a sua evolução em função do número de partículas contidas num determinado domínio conforme ilustrado na Figura 3.14.



**Figura 3.14 – Gráfico da distância característica entre partículas em função do número de partículas contidas num determinado domínio**

### 3.2.7. Formação da camada solidificada

A solidificação do material situado na periferia da parede do molde foi replicada através da formação de áreas adjacentes retangulares, nas quais a velocidade das partículas foi igualada a zero, possibilitando a identificação das zonas de material solidificado face à imobilização das partículas. A formação destes retângulos deu-se em passos de tempo sucessivos, sendo o primeiro retângulo formado após  $t_1$  segundos de simulação, assim definido pelo utilizador.

Foi assumido que a aresta inferior do domínio se encontra no mesmo plano que a superfície arrefecida do molde e que a altura dos retângulos gerados é sucessivamente menor, pelo que:

$$h_{i+1} < h_i \quad (3.22)$$

Onde  $h_i$  representa a altura do retângulo arbitrário  $i$  e  $h_{i+1}$  a altura do retângulo adjacente a  $h_i$  formado no passo de tempo seguinte.

Foram definidas as variáveis  $x_{1_i}, x_{2_i}, y_{1_i}$  e  $y_{2_i}$  para designar, por essa ordem, os limites inferiores e superiores de cada retângulo segundo as direções  $x$  e  $y$ , tendo-se armazenado estas variáveis numa matriz em que cada linha é referente aos limites de um retângulo:

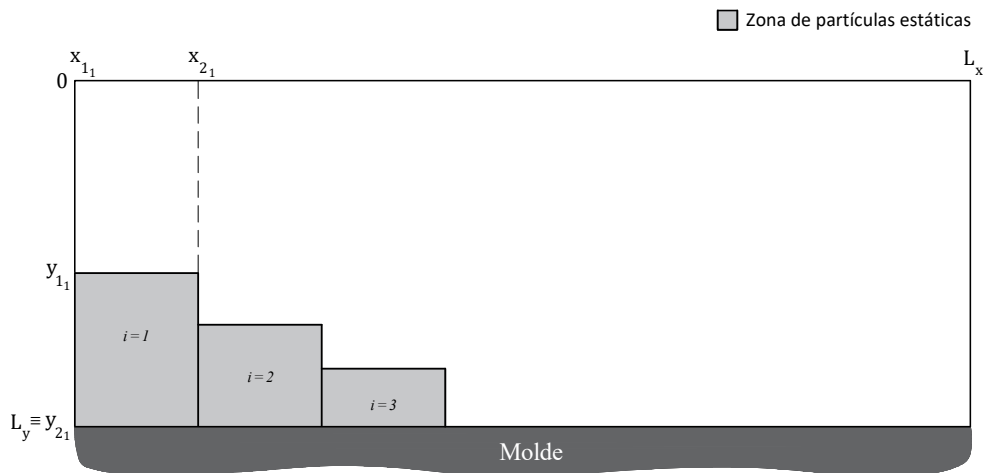
$$R = \begin{bmatrix} x_{1_1} & x_{2_1} & y_{1_1} & y_{2_1} \\ x_{1_2} & x_{2_2} & y_{1_2} & y_{2_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Tem-se, então, que uma dada partícula é colocada em repouso caso as suas coordenadas verifiquem as condições:

$$\begin{cases} x_{1_i} \leq x \leq x_{2_i} \\ y_{1_i} \leq y \leq y_{2_i} \end{cases} \quad (3.24)$$

Uma vez que os retângulos são formados em passos de tempo sucessivos, e não em simultâneo, as condições anteriores são verificadas no instante de tempo da respetiva formação do retângulo  $i$ , dado por:

$$t_i = t_1 + (i - 1)\Delta_t \quad (3.25)$$



**Figura 3.15 – Formação de retângulos adjacentes em passos de tempo sucessivos**

A implementação numérica das áreas retangulares solidificadas esteve em consonância com a metodologia anteriormente exposta, identificando-se, em primeira instância, as partículas para as quais as condições enunciadas em (3.24) são verificadas no respetivo instante de tempo da formação do retângulo  $i$ . Após identificadas as partículas, as suas coordenadas permanecem inalteradas até ao fim da simulação, sendo apenas atualizadas as coordenadas das partículas situadas fora dos retângulos.

### 3.2.8. Correção da entrada de partículas no domínio

A formação dos retângulos de solidificação tem como implicação a reformulação do critério 4 enunciado no subcapítulo 3.2.5, alusivo à área de introdução de novas partículas no domínio. É fácil compreender que face à formação do retângulo adjacente ao limite esquerdo do domínio, correspondente ao primeiro retângulo formado, as partículas não poderão ser introduzidas no intervalo de valores compreendido pela altura desse mesmo retângulo. Consequentemente, a coordenada aleatória  $y$  atribuída às partículas irá variar no intervalo  $[0, y_{1_1}]$ , permanecendo o critério preconizado em 3.2.5 para a atribuição de coordenadas aleatórias segundo  $x$ , dado pelo intervalo  $[0, V_x \Delta_t]$ . Na Figura 3.16, é exibida, a tracejado, a área de

introdução das partículas no domínio que obedece à nova condição estipulada, verificando-se uma redução da área de entrada das partículas provocada pela formação do primeiro retângulo.

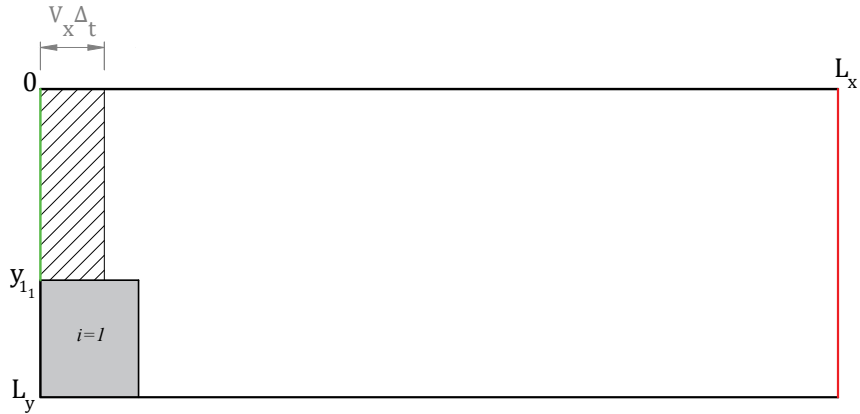


Figura 3.16 – Correção da entrada do domínio

Salienta-se que esta correção da entrada do domínio apenas é efetuada após se dar a formação do primeiro retângulo, ou seja, para  $t \geq t_1$ . Para o intervalo de tempo que antecede a formação dos retângulos, a entrada do domínio corresponde a todo o limite esquerdo deste, como já antes visto.

### 3.2.9. Correção da coordenada y na esteira dos retângulos

Um outro problema que se constata aquando da formação dos retângulos é o aparecimento de uma zona de sombra na esteira dos mesmos, onde se verifica uma descontinuidade do escoamento manifestada por uma ausência total de partículas a escoar nessas regiões. Esta total inexistência de partículas a ocupar as zonas a jusante dos retângulos, advém da hipótese simplificativa inicialmente considerada de se aproximar o escoamento ao caso unidimensional, em que as partículas apenas se deslocam segundo a direção  $x$ . Como resultado, as partículas são impossibilitadas de contornar os retângulos, formando-se um vazio na esteira destes.

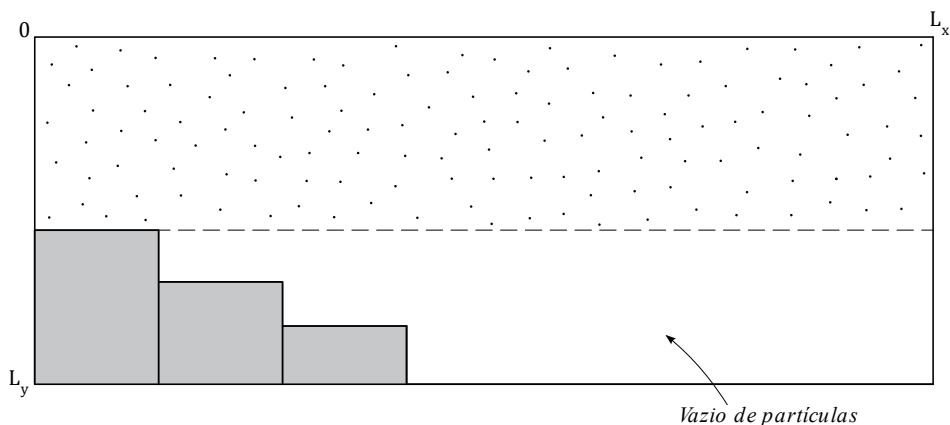


Figura 3.17 – Vazio de partículas na esteira dos retângulos

A resolução do problema aqui retratado foi conseguida através de uma correção da coordenada vertical das partículas, na qual se obedeceu à equação apresentada em (3.26),

considerando-se, desde já, que a explicação do conceito é dada para a correção da esteira de um retângulo genérico  $i$ , em que  $t_1$  e  $t_2$  representam dois instantes de tempo sucessivos espaçados de  $\Delta_t$  segundos (Vaz, 2021d):

$$y_{\text{corrigido}}(t_2) = y(t_2) \frac{y_{1_{i+1}}}{y_{1_i}} \quad (3.26)$$

A aplicação da equação anterior é restrita às partículas cujas coordenadas verificam as condições:

$$\begin{cases} x(t_1) < x_{2_i} \\ x(t_2) > x_{2_i} \end{cases} \quad (3.27)$$

Através da Figura 3.18, é perceptível que esta metodologia se trata de uma atualização da coordenada vertical das partículas que acabam de exceder a abcissa  $x_{2_i}$  no intervalo de tempo compreendido entre  $t_1$  e  $t_2$ .

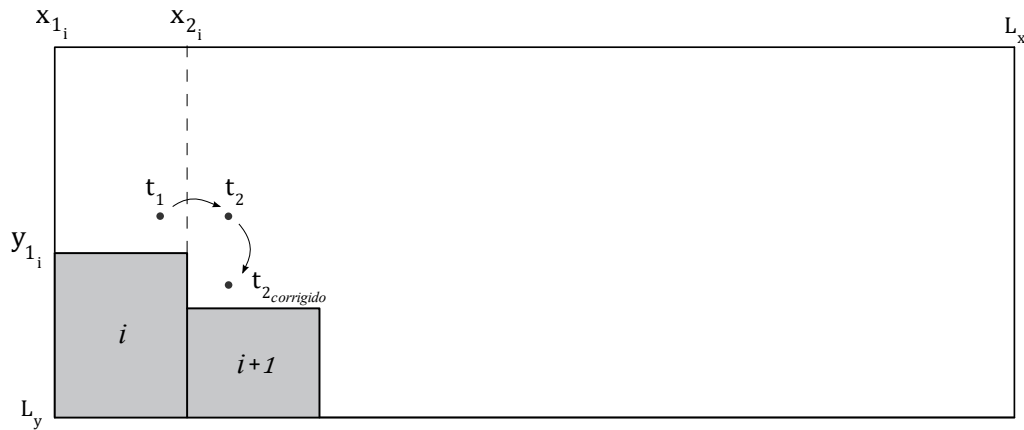


Figura 3.18 – Correção da coordenada  $y$  de uma partícula na esteira de um retângulo genérico  $i$

Sublinha-se também o facto da correção da coordenada  $y$  ser efetuada após atualizadas as coordenadas das partículas, ou seja, após aplicadas as equações cinemáticas aqui relembradas:

$$\begin{cases} x(t_2) = x(t_1) + V_x \Delta_t \\ y(t_2) = y(t_1) + V_y \Delta_t \end{cases} \quad (3.28)$$

Por fim, este processo é estendido a todos os retângulos formados, sendo a equação (3.26) naturalmente modificada para a correção da esteira do último retângulo:

$$y_{\text{corrigido}}(t_2) = y(t_2) \frac{L_y}{y_{1_i}} \quad (3.29)$$

# 4

## Resultados

### 4.1. Introdução

Neste capítulo será exibida uma sequência temporal de imagens, geradas pelo código desenvolvido, com o propósito de se apresentar os resultados obtidos por meio da implementação numérica dos conceitos abordados no capítulo anterior. As imagens aqui expostas serão referentes a instantes de tempo sucessivos, tendo-se selecionado um conjunto composto por quatro imagens que se consideram apropriadas para clarificar o trabalho efetuado. Como tal, foi definido que serão formados dois retângulos de material solidificado delimitados pelos valores contidos na matriz  $R$  abaixo apresentada, e cuja interpretação se encontra explícita no subcapítulo 3.2.7:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 50 & 70 & 100 \\ 50 & 100 & 85 & 100 \end{bmatrix} (mm) \quad (4.1)$$

De modo a se tornar perceptível a formação dos retângulos, a primeira imagem da sequência será alusiva ao campo de partículas no instante de tempo que antecede a formação da primeira área retangular solidificada, e a última imagem relativa ao campo de partículas no instante de tempo posterior à formação da segunda área retangular solidificada.

Relembrando que os retângulos são formados em passos de tempo sucessivos, tem-se, portanto, que a sequência a ser exibida está em conformidade com o seguinte esquema:

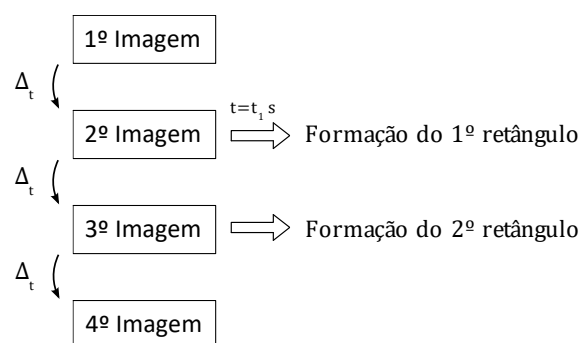


Figura 4.1 – Representação esquemática da sequência de imagens

Destaca-se também que os valores estabelecidos para as variáveis de simulação encontram-se expressos na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Valores definidos para as variáveis de simulação.**

Variável	Valor definido
$L_x$ [m]	0,2
$L_y$ [m]	0,1
$b$ [m]	0,0005
$N$	600
$\Delta_t$ [s]	0,1
$fps$ [ $s^{-1}$ ]	10
$T_s$ [s]	1
$t_1$ [s]	0,5
$V_x$ [m/s]	0,04
$V_y$ [m/s]	0
$pm$ (%)	20

É de notar que o passo de tempo utilizado se encontra abaixo do máximo definido pela inequação (3.21) para as variáveis do caso:

$$\Delta_t < 0,1266 \text{ s} \quad (4.2)$$

Atendendo ao facto de serem exibidas apenas quatro imagens relativas a instantes de tempo sucessivos, e satisfazendo o limite imposto em (4.2), procurou-se que o passo de tempo utilizado tornasse perceptível o deslocamento efetuado pelas partículas de imagem para imagem.

Por fim, pode-se constatar que a velocidade de injeção definida, correspondente à velocidade das partículas dispersas no fluido, é inferior à que se verifica num processo de injeção real, onde a velocidade de injeção típica é de 0,2 m/s (Babenko et al., 2018). Tal é explicado, visto a montagem experimental que se pretende replicar não envolver pressões equiparáveis às de um processo real, pelo que a velocidade do escoamento de polímero fundido será substancialmente menor.

## 4.2. Imagens geradas

Antes de se proceder à exposição das imagens geradas, convém referir que foram assinalados quatro grupos de partículas, cada grupo constituído por um conjunto de partículas vizinhas e utilizado para demonstrar um determinado conceito. Esta identificação teve o intuito de facilitar o rastreio das partículas de imagem para imagem, e assim se acompanhar a sua evolução espacial.

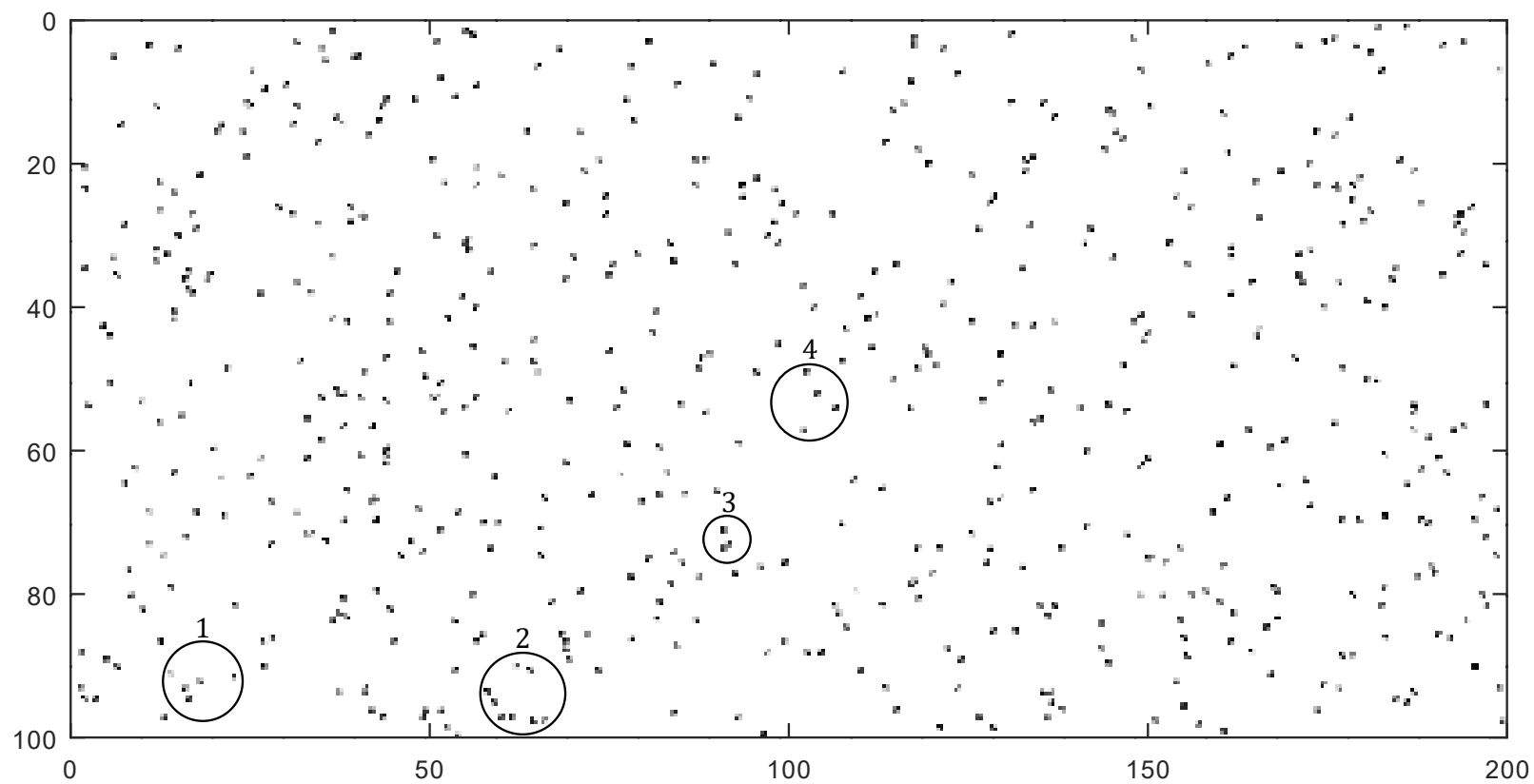


Figura 4.2 – Primeira imagem da sequência

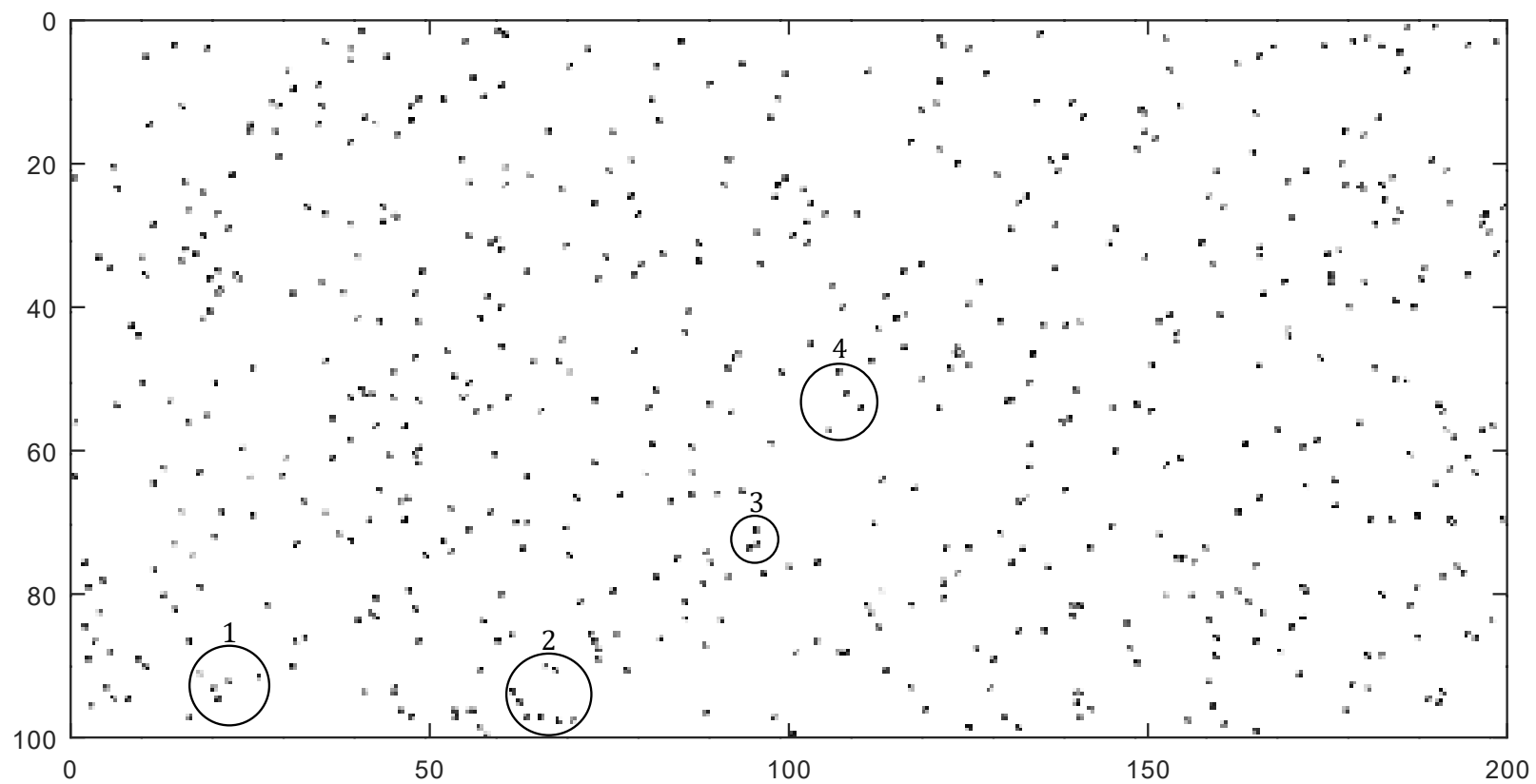


Figura 4.3 – Segunda imagem da sequência

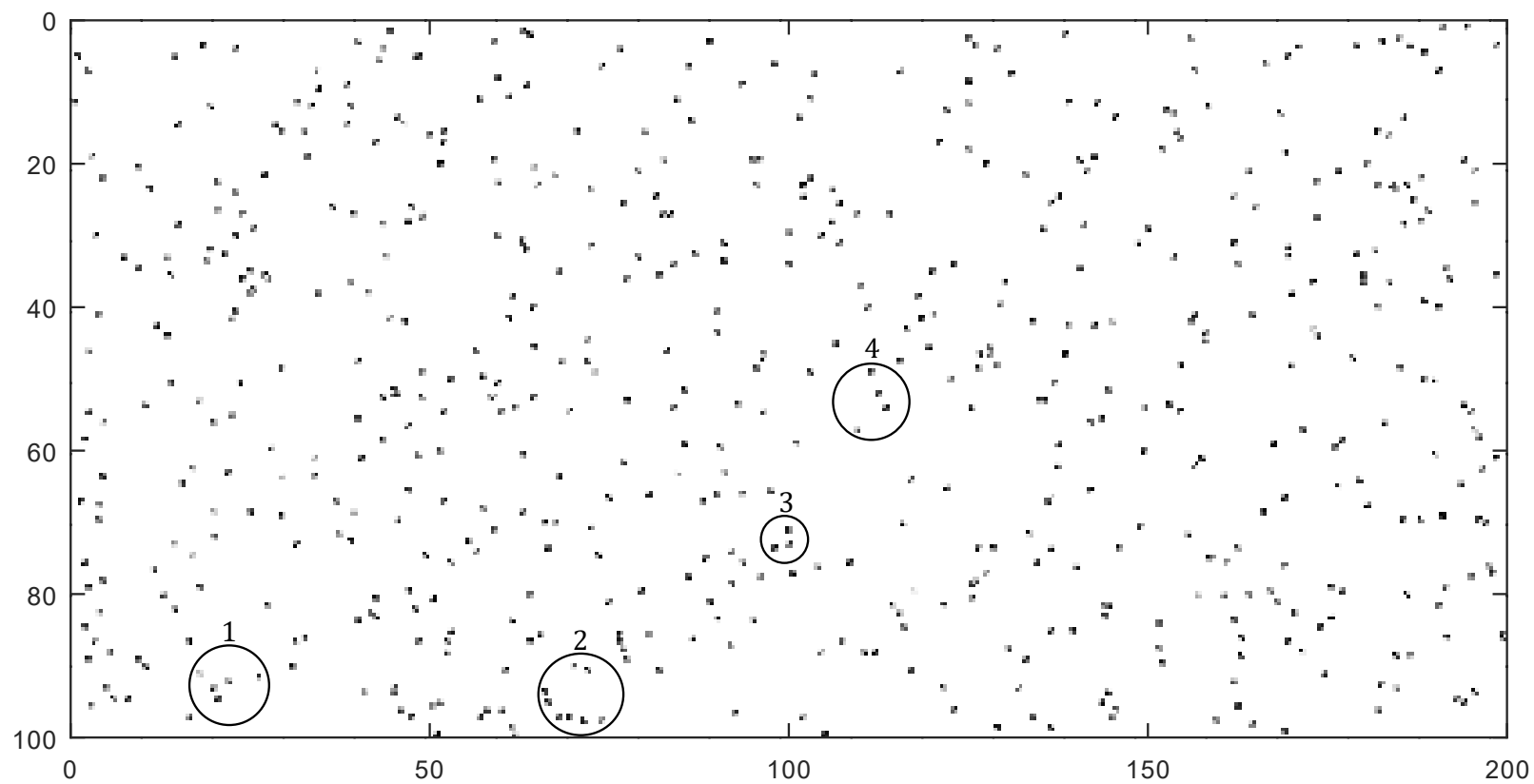


Figura 4.4 – Terceira imagem da sequência

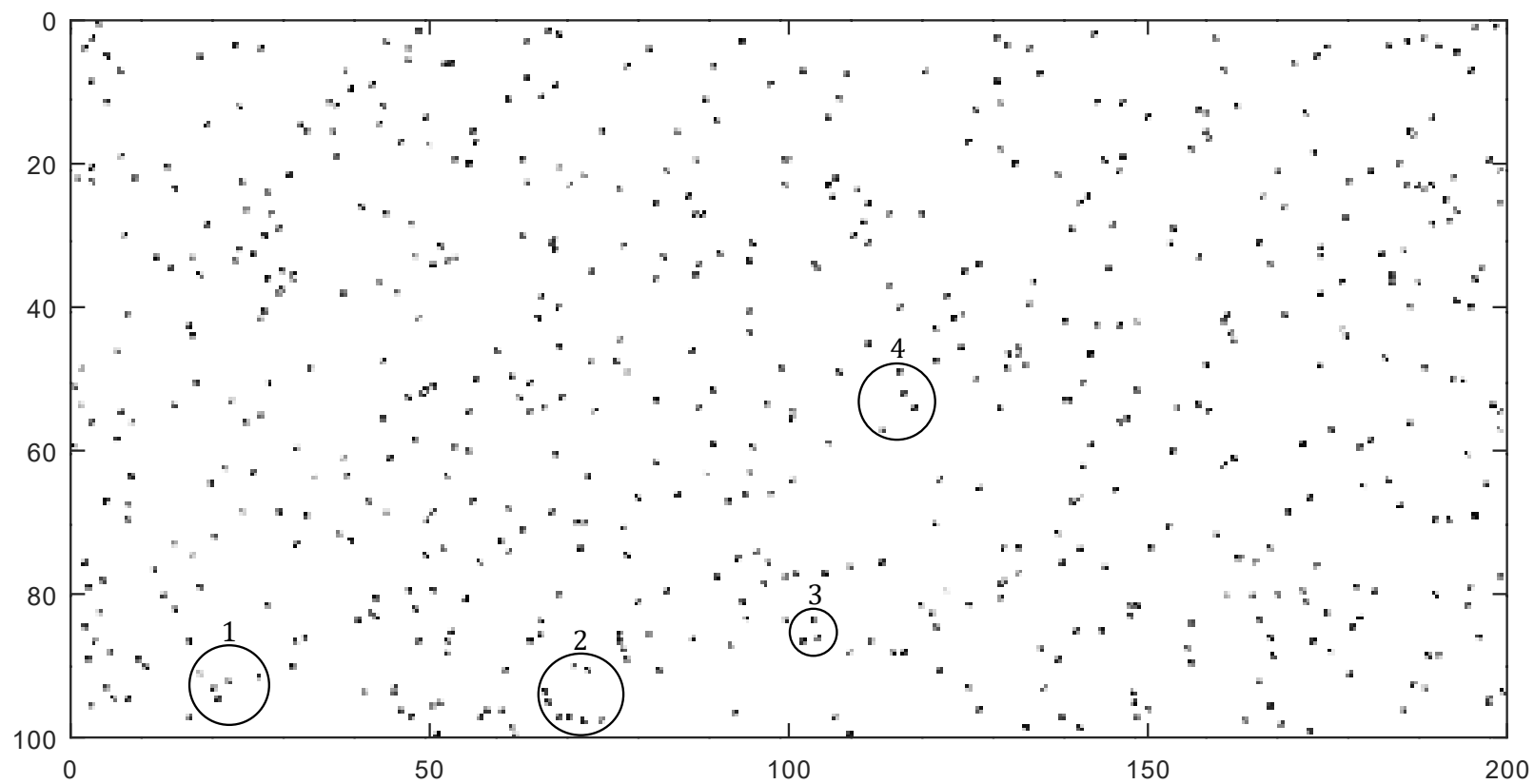


Figura 4.5 – Quarta imagem da sequência

### 4.3. Análise da sequência de imagens

Nesta secção será efetuada uma análise aos conceitos que podem ser observados através dos quatro grupos de partículas identificados nas imagens anteriores.

Começa-se por analisar o primeiro grupo de partículas, onde se pode verificar que a partir da segunda imagem da sequência, as partículas permanecem estáticas até ao fim da simulação. Tal revela a formação do primeiro retângulo de material solidificado, manifestado por uma imobilização das partículas nele contidas no instante de tempo da sua formação.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao segundo grupo de partículas, utilizado para identificar a formação do segundo retângulo de material solidificado. Neste caso, pode-se observar uma imobilização das partículas no passo de tempo seguinte à formação do primeiro retângulo, ou seja, a partir da terceira imagem da sequência. Verifica-se, deste modo, um aumento da fração sólida do material à medida que a simulação avança, revelada pelo aumento crescente do número de partículas que permanecem estáticas, indicando que estão localizadas numa zona de material já solidificado.

O terceiro grupo de partículas visa demonstrar a correção da coordenada  $y$  na esteira do segundo retângulo. Como perceptível no passo de tempo seguinte à formação do segundo retângulo, o grupo de partículas assinalado apresenta movimento de translação não apenas segundo a direção  $x$ , mas também segundo  $y$ , passando a ocupar a região a jusante do retângulo. Tal conceito também se torna claro, quando se analisa a esteira do primeiro retângulo na segunda e terceira imagem da sequência, sendo notório o aparecimento de novas partículas na esteira deste decorridos  $\Delta_t$  segundos da sua formação.

Por último, o quarto grupo de partículas permite constatar a perturbação de velocidade imposta às partículas. Uma análise atenta à evolução da posição ocupada pelas partículas possibilita concluir que estas apresentam movimento relativo entre si, facto que se torna evidente quando se compara a disposição espacial das partículas, integrantes do quarto grupo, na primeira e na última imagem da sequência. Esta perturbação de velocidade é igualmente visível nas partículas incluídas no terceiro grupo.

Além dos conceitos abordados com recurso às partículas identificadas, podem ser observados outros princípios previamente definidos no capítulo anterior. Entre estes é de destacar a entrada de partículas no domínio, que como se pode perceber é diferente a partir do momento em que se dá a formação do primeiro retângulo, verificando-se uma redução da área de entrada do domínio provocada pela solidificação do material. Ademais, torna-se claro a importância atribuída à correta definição da entrada e saída de partículas do domínio, fulcral para a obtenção do escoamento contínuo de partículas alcançado. Resultado dessa correta definição, é a ideia

transmitida que o domínio apenas capta uma parte do escoamento, desenvolvendo-se este de forma idêntica quer a montante e a jusante do domínio, com uma densidade de partículas semelhante, porém com uma disposição espacial e uma aparência distinta das partículas dispersas no fluido, como se pode observar aquando da entrada de novas partículas.

Outro aspeto fundamental que se destaca, apesar de mais evidente, é o facto das partículas serem representadas por meio de quatro píxeis, como preconizado no subcapítulo 3.2.2. A partir de uma análise às imagens anteriores, é visível uma multiplicidade de soluções para a aparência individual de cada partícula, resultante da atribuição aleatória de cores, segundo uma escala de cinzento, aos quatro píxeis de cada partícula. É de notar, de igual modo, que cada partícula retém as cores dos seus píxeis de passo de tempo para passo de tempo, sem nunca se observar uma alteração da sua aparência no decurso do seu movimento de translação pelo domínio.

## Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

---

### 5.1. Conclusões

Começa-se por referir, relativamente ao caso de estudo considerado na dissertação, que foi alcançada uma metodologia capaz de determinar a espessura das cascas de material formadas aquando do processo de injeção. Concluiu-se, então, que a espessura das cascas diminui ao longo do campo de escoamento, sendo intrinsecamente acompanhada por uma redução da velocidade do material.

Em relação à temática central deste trabalho, síntese de imagens, expõe-se, em primeira instância, que foi estabelecido com sucesso um domínio de geometria retangular de dimensões ajustáveis, que posteriormente discretizado resultou na geração de uma malha uniforme composta por elementos quadráticos de dimensão variável. A par da definição do domínio de estudo, estabeleceu-se devidamente a cor branca como cor de fundo das imagens sintetizadas.

No que diz respeito à população do domínio com partículas em posições arbitrárias, pode-se afirmar que o método escolhido permitiu a obtenção de resultados satisfatórios, respeitando a aleatoriedade pretendida na atribuição de coordenadas às partículas. Por sua vez, a representação das partículas no domínio foi também satisfatória, tendo-se cumprido tanto o critério de atribuição aleatória de cores segundo uma escala de cinzento aos píxeis de cada partícula, bem como o critério que dita o número e disposição geométrica dos píxeis constituintes das partículas.

Acerca da translação imposta às partículas, gerou-se uma sequência de imagens que retratam o campo de partículas em instantes distintos, sendo perceptível o deslocamento efetuado pelas partículas de imagem para imagem. Previamente à geração da sequência temporal de imagens, definiu-se apropriadamente variáveis de simulação empregues na definição da velocidade das partículas, tempo de simulação, número de imagens geradas por segundo e passo de tempo. A partir das variáveis de simulação definidas, as coordenadas das partículas foram corretamente atualizadas em cada passo de tempo, verificando-se, após a atualização de

coordenadas, uma precisa reintrodução das partículas no domínio sem que as cores dos píxeis fosse alterada.

Introduziu-se com sucesso as pequenas perturbações de velocidade às partículas, satisfazendo-se a aleatoriedade das perturbações geradas para cada partícula em cada passo de tempo. A entrada e saída de partículas do domínio foi igualmente realizada com sucesso, obedecendo-se aos critérios relativos à conservação de partículas no domínio, entrada de partículas de aparência distinta e área de introdução de novas partículas.

O passo de tempo foi devidamente limitado, atendendo-se à condição do passo espacial ter de ser inferior à distância característica entre partículas, também designada de distância média entre partículas vizinhas. Inerentemente, conseguiu-se obter uma equação, validada experimentalmente, que permite determinar a distância característica entre partículas em função das dimensões do domínio e do número de partículas contidas neste.

Numa fase já avançada do trabalho, conseguiu-se replicar corretamente a formação da camada solidificada nas imediações da superfície do molde, imobilizando-se as partículas contidas nas áreas retangulares predefinidas no instante de tempo da sua formação. Posteriormente, implementou-se com sucesso a entrada de novas partículas no domínio, respeitando-se a parte da secção de entrada já ocupada com material solidificado. Por fim, a correção da coordenada vertical das partículas na esteira dos retângulos foi efetuada de maneira sistemática, cumprindo-se exatamente os critérios estipulados.

## 5.2. Sugestões de trabalho futuro

Embora as imagens geradas nesta dissertação permitam efetuar uma primeira aproximação das imagens que se esperam vir a captar pela via experimental, ainda se verifica um certo desfasamento face à realidade provocado pelas simplificações adotadas. Estas simplificações, implementadas tanto a nível do caso de estudo como a nível numérico, permitiram atenuar a complexidade associada a uma total replicação de um escoamento com solidificação real, limitando, no entanto, a capacidade de se produzir imagens que melhor retratem um processo de escoamento efetivo.

Assim, e no seguimento do trabalho desenvolvido na dissertação em questão, são apresentadas, nos subcapítulos seguintes, sugestões de trabalho futuro com a finalidade de se dar continuidade ao trabalho já efetuado, incrementando-se o seu valor.

### 5.2.1. Aperfeiçoamento das imagens sintetizadas

Como transmitido ao longo do documento, o código desenvolvido permite gerar um campo de partículas em que estas apresentam uma geometria quadrangular e são representadas por meio de quatro píxeis. Embora este arranjo geométrico permita efetuar uma aproximação às imagens

que se prevêem registar num futuro escoamento real do processo, não replica na totalidade uma situação real, na qual as partículas são expectáveis de apresentar uma geometria aproximadamente esférica. Sugere-se como desenvolvimento futuro uma representação das partículas tendo em vista a obtenção de uma geometria circular, sendo estas representadas por um maior número de píxeis e com recurso à técnica de *antialiasing*. Desta maneira, será possível replicar, com maior exatidão, a aparência real das partículas aleatoriamente dispersas num fluido.

Conjuntamente com a modificação da geometria das partículas, será interessante alterar o fundo das imagens sintetizadas no sentido de se conferir um aspeto visual mais realista às mesmas. Para esse fim, pode ser empregue uma imagem real que se considere apropriada para estabelecer como fundo das imagens sintetizadas, tendo sempre como finalidade a mimetização das imagens que se esperam captar numa futura montagem experimental do processo.

Considera-se também pertinente, levantar a hipótese simplificativa que negligencia os efeitos viscosos, replicando-se, na maneira do possível, o desenvolvimento de camada limite sobre a superfície horizontal do molde.

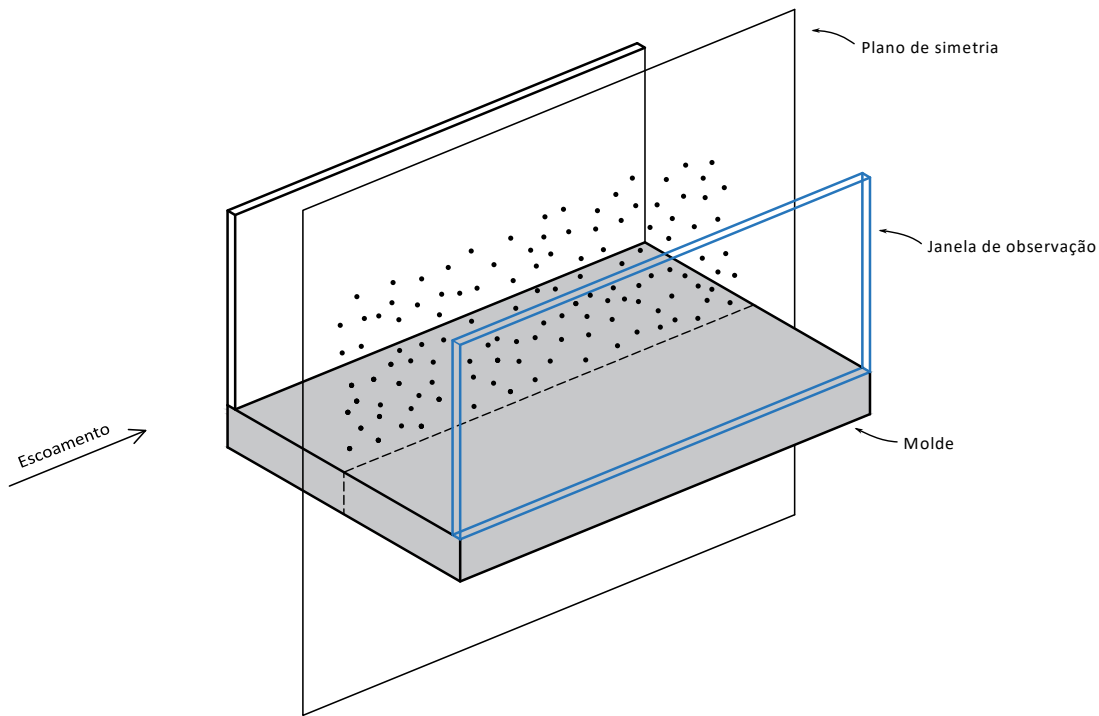
Por fim, um apreciável acréscimo a ser implementado, é o de se considerar a colisão entre partículas vizinhas, como consequência das partículas apresentarem movimento relativo entre si. Esta colisão seria aplicada a grupos restritos de partículas vizinhas, para a situação em que as partículas apresentam as mesmas coordenadas, continuando, contudo, a existir também uma sobreposição de partículas e não somente colisão.

### 5.2.2. Aparato experimental

Na sequência do escoamento numérico desenvolvido neste trabalho, aponta-se como trabalho futuro a conceptualização de um aparato experimental que possibilite a obtenção de um estudo experimental em condições semelhantes às verificadas no estudo numérico. Deste modo, procurar-se-á simular, dentro do possível, o caso de estudo considerado na presente dissertação, relembrando-se que se trata do escoamento, com solidificação, de um fluido transparente com partículas dispersas sobre uma parede plana arrefecida, aproximado ao caso unidimensional. Este escoamento será captado através de uma câmara de vídeo de alta velocidade, com a finalidade de ser estudado o desenvolvimento da camada solidificada.

É de salientar que um dos critérios estabelecidos a ser cumprido na realização deste estudo, aponta para o facto da introdução de partículas no polímero ser efetuada ao longo do plano de simetria do equipamento experimental, como ilustrado na Figura 5.1. Por intermédio deste critério, é assegurado que as partículas incluídas no polímero se encontram numa zona do escoamento não perturbada pelos efeitos viscosos verificados nas imediações das paredes verticais do molde, o que constituiria um problema na tentativa de se replicar o caso de estudo

numérico. Destaca-se que por clareza de representação, não se incluiu a superfície de topo do aparato experimental esquematizado na Figura 5.1.



**Figura 5.1 – Esquema do conceito do aparato experimental, mostrando as partículas dispersas no seu plano médio. As proporções podem não corresponder à concretização final do aparato.**

Relativamente a esta técnica experimental pode-se adiantar, desde já, que um dos polímeros candidatos a ser utilizado é o termoplástico PLEXIGLAS® 8N (Vaz, 2021c). Este polímero é caracterizado pela sua transparência, temperatura de fusão relativamente baixa e baixa viscosidade do fundido, propriedades que o tornam apropriado para a técnica experimental em questão. Também se desenvolve que a janela de observação, incorporada numa das faces do molde, será fabricada em vidro de borossilicato ou de quartzo, escolha efetuada atendendo à temperatura elevada a que será sujeita, resultante do contacto direto com o polímero fundido. Por fim, salienta-se a necessidade de pré-aquecer o vidro, de forma a não se dar a solidificação do polímero em contacto com este, o que causaria uma perturbação da visualização do escoamento resultante do fenómeno de refração da luz.

## Referências

---

- Babenko, M., Sweeney, J., Petkov, P., Lacan, F., Bigot, S., e Whiteside, B. (2018). Evaluation of heat transfer at the cavity-polymer interface in microinjection moulding based on experimental and simulation study. *Appl. Therm. Eng.* 130, 865–876. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.11.022.
- Beaumont, J. P. (2004). *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9781569905913.
- Bendada, A., Derdouri, A., Lamontagne, M., e Simard, Y. (2004). Analysis of thermal contact resistance between polymer and mold in injection molding. *Appl. Therm. Eng.* 24, 2029–2040. doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.12.027.
- Bryce, D. M. (1996). *Plastic Injection Molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Bryce, D. M. (1998). *Plastic Injection Molding: mold design and construction fundamentals*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Cardoso, R. P. (2019). Simulação em Moldflow de injeções de uma régua: contributos para um modelo simplificado célere. [Dissertação de mestrado]. [Lisboa]: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.
- Casquilho, M. (2007). Simulação: geração de números pseudo-aleatórios. [Documento de apoio à disciplina de Investigação Operacional, lecionada no Instituto Superior Técnico]. <https://web.tecnico.ulisboa.pt/mcasquilho/acad/or/simul/GerNumAleat.pdf>
- Ching, Y. C., Chuah, C. H., Ching, K. Y., Abdullah, L. C., e Rahman, A. (2017). Applications of thermoplastic-based blends. *Recent Dev. Polym. Macro, Micro Nano Blends Prep. Characterisation*, 111–129. doi:10.1016/B978-0-08-100408-1.00005-4.
- Dangel, R. (2016). *Injection Moulds for Beginners*. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9781569906323.fm.
- Drobny, J. G. (2014). *Handbook of Thermoplastic Elastomers*. 2.<sup>a</sup> ed. Nova Iorque: William Andrew Publishing. doi:10.1016/C2013-0-00140-5.
- Fischer, J. M. (2012). *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*. 2.<sup>a</sup> ed. Nova Iorque: Plastic Design Library. doi:10.1016/C2011-0-06800-X.
- Frederico, J. T. (2020). Desenvolvimento da camada solidificada na moldagem por injeção: uma abordagem simplificada para escoamento sobre um plano arrefecido. [Dissertação de mestrado]. [Lisboa]: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

## Referências

- Gedde, U. W., e Hedenqvist, M. S. (2019). *Fundamental Polymer Science*. 2.<sup>a</sup> ed. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-29794-7.
- Geomiq. (2021). Injection Moulding Guide | 2021 Update | What is Injection Moulding?. <https://geomiq.com/injection-moulding-design-guide/> [Consultado em agosto, 2021].
- Guevara-Morales, A., e Figueroa-López, U. (2014). Residual stresses in injection molded products. *J. Mater. Sci.* 49, 4399–4415. doi:10.1007/s10853-014-8170-y.
- Kamal, M. R., Isayev, A., e Liu, S.-J. (2009). *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9783446433731.
- Kazmer, D. O. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. 2.<sup>a</sup> ed. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9783446434196.fm.
- Liu, Y., e Gehde, M. (2015). Evaluation of heat transfer coefficient between polymer and cavity wall for improving cooling and crystallinity results in injection molding simulation. *Appl. Therm. Eng.* 80, 238–246. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.01.064.
- Lovell, P. A., e Young, R. J. (2011). *Introduction to Polymers*. 3.<sup>a</sup> ed. Nova Iorque: CRC Press.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., e Rothmayer, A. P. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7.<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Odian, G. (2004). *Principles of Polymerization*. 4.<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons. doi:10.1002/047147875X.
- Park, H.-S., e Dang, X.-P. (2017). Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels. *Procedia Manuf.* 10, 48–59. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.020.
- Rees, H., e Catoen, B. (2006). *Selecting Injection Molds*. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9783446413023.fm.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., e Rosato, M. G. (2000). *Injection Molding Handbook*. 3.<sup>a</sup> ed. Boston: Springer. doi:10.1007/978-1-4615-4597-2.
- Sasikumar, C., Srikanth, S., e Das, S. K. (2006). Analysis of premature failure of a tie bar in an injection molding machine. *Eng. Fail. Anal.* 13, 1246–1259. doi:10.1016/j.engfailanal.2005.11.003.
- Sousa, J. M. P. B. (2015). Integração das tensões residuais e deformações provenientes do processo de injeção na simulação estrutural por elementos finitos de componentes poliméricos. [Dissertação de mestrado]. [Lisboa]: Instituto Superior Técnico.
- Valero, J. R. L. (2020). *Plastics Injection Molding: scientific molding, recommendations and best practices*. Cincinnati: Hanser Publications. doi:10.3139/9781569906903.
- Vaz, D. C. (2021a). Comunicação particular, 13 de Abril.
- Vaz, D. C. (2021b). Comunicação particular, 26 de Abril.
- Vaz, D. C. (2021c). Comunicação particular, 25 de Maio.
- Vaz, D. C. (2021d). Comunicação particular, 15 de Julho.
- Vaz, D. C., e Xavier, J. M. C. (2020). Comunicação particular.
- Wang, T.-H., e Young, W.-B. (2005). Study on residual stresses of thin-walled injection molding. *Eur. Polym. J.* 41, 2511–2517. doi:10.1016/j.eurpolymj.2005.04.019.
- Whelan, T., e Goff, J. (1990). *Injection Molding of Thermoplastics Materials — 1*. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold. doi:10.1007/978-1-4757-0582-9.
- Xie, L., Shen, L., e Jiang, B. (2011). Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process. *Comput. Fluid Dyn. Technol. Appl.* doi:10.5772/16283.



2022

FRANCISCO MANUEL DA SILVA  
BRANQUINHO ROSA

VISUALIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA CAMADA  
SOLIDIFICADA NA MOLDAGEM POR INJEÇÃO  
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SÍNTESE NUMÉRICA DE IMAGEM