



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Estudo da injeção experimental e numérica de peças produzidas em material compósito de matriz polimérica

Tiago José Serrador Lourenço

Leiria, Abril de 2020

Esta página foi intencionalmente deixada em branco



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Estudo da injeção experimental e numérica de peças produzidas em material compósito de matriz polimérica

Tiago José Serrador Lourenço

Trabalho de projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida e coorientação da Professora Doutora Milena Maria Nogueira Vieira, ambos Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Abril de 2020

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, pelo equipamento necessário para a realização dos ensaios práticos;

Aos meus orientadores, Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida e Professora Doutora Milena Maria Nogueira Vieira, pela disponibilidade, orientação e auxílio na parte científica, que foi indispensável na elaboração deste relatório;

À Eng.^a Fernanda Carvalho, pelo auxílio prestado na realização de toda a temática laboratorial nos laboratórios de Eng.^a Mecânica da ESTG;

Ao Eng.^o Nuno Rodrigues da empresa Omya, pela cedência da matéria prima utilizada no processo de injeção dos provetes;

À Raquel, por todo o seu apoio, compreensão e acompanhamento neste meu objetivo;

À minha família, pelo apoio neste projeto.

Muito obrigado a todos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Nos dias de hoje, os materiais compósitos de matriz polimérica são dos mais utilizados nas principais indústrias de mercado de consumo e afins. Os compósitos de matriz polimérica continuam em constante desenvolvimento, onde as suas características e propriedades mecânicas são o principal alvo de estudos nas conjugações de entre as matrizes termoplásticas e os vários tipos de materiais de reforço, desde metais às principais fibras existentes no mercado, minerais, talco, fibras vegetais e até mesmo cascas de sementes de girassol.

O presente projeto de dissertação de mestrado descreve através de engenharia assistida por computador (CAE) o estudo da orientação das fibras de vidro de um material compósito de matriz polimérica termoplástica, tendo sido considerado um Polipropileno (PP) com 20% de reforço de fibra de vidro. Neste estudo reológico, os resultados obtidos são o produto da comparação feita em relação à orientação das fibras de vidro segundo os métodos de orientação das fibras disponíveis no *software* Moldex3D e com os cálculos desenvolvidos em malha normal e malha BLM.

Após a elaboração do processo de injeção plástica, com os mesmos parâmetros utilizados no moldex3D, procedeu-se a ensaios mecânicos, de densidade, análise DMA, análise DSC e de Dureza Shore com os provetes obtidos analisando os resultados adquiridos.

Foi possível a observação da orientação tomada pelas fibras de vidro durante a simulação de enchimento do molde, assim como se conseguiu verificar os resultados da orientação do reforço por meio de observação microscópica segundo o fluxo físico nos provetes obtidos por injeção plástica, confirmando tal efeito idêntico ao simulado em Moldex3D.

Palavras-chave: CAE, Fibra de Vidro, Injeção plástica, Moldex3D, Polipropileno

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Nowadays, polymer matrix composite materials are among the most used in the main consumer and related market industries. Polymer matrix composites continue to develop constantly, where their characteristics and mechanical properties are the main target of studies on the conjugations between thermoplastic matrices and the various types of reinforcement materials, from metals to the main fibers on the market, minerals, talc, vegetable fibers and even sunflower seed shells.

This master's thesis project describes through computer-assisted engineering (CAE) the study of the orientation of glass fibers of a composite material of thermoplastic polymer matrix, having been considered a Polypropylene (PP) with 20% fiberglass reinforcement. In this rheological study, the results obtained are the product of the comparison made in relation to the orientation of the glass fibers according to the fiber orientation methods available in Moldex3D *software* and with the calculations developed in normal mesh and BLM mesh.

After the preparation of the plastic injection process, with the same parameters used in moldex3D, mechanical tests, density, DMA analysis, DSC and Shore Hardness analysis were performed with the specimens obtained by analyzing the results acquired.

It was possible to observe the orientation taken by the glass fibers during the simulation of mold filling, as well as to verify the results of the reinforcement orientation by microscopic observation according to the physical flow in the specimens obtained by plastic injection, confirming this effect identical to the simulated in Moldex3D.

Keywords: CAE, Glass Fiber, Plastic injection, Moldex3D, Polipropylene

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

| | |
|---|------|
| Agradecimentos..... | iii |
| Resumo..... | v |
| Abstract..... | vii |
| Lista de figuras..... | xi |
| Lista de tabelas | xv |
| Lista de siglas e símbolos..... | xvii |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento Histórico | 1 |
| 1.2 Objetivos | 3 |
| 1.3 Estrutura..... | 4 |
| 2 ESTADO DA ARTE..... | 5 |
| 2.1 Processo de moldação por injeção | 5 |
| 2.1.1 Máquina de injeção para a indústria do plástico..... | 5 |
| 2.1.2 Molde para injeção de plástico | 7 |
| 2.2 Ciclo de moldação por injeção..... | 7 |
| 2.3 Parâmetros utilizados na injeção de plásticos..... | 10 |
| 2.3.1 Variáveis e parâmetros operatórios do processo de injeção..... | 10 |
| 2.3.2 Parâmetros do processo | 15 |
| 2.3.3 Parâmetros do material | 15 |
| 2.3.4 Pressão de injeção e fatores que influenciam a pressão | 16 |
| 2.4 Polímeros | 18 |
| 2.4.1 Estrutura e propriedades dos polímeros..... | 18 |
| 2.4.2 Processo de Polimerização | 20 |
| 2.4.3 Classificação de Plásticos | 21 |
| 2.4.4 Compósitos de matriz polimérica..... | 25 |
| 3 FENÓMENOS REOLÓGICOS DO PROCESSO..... | 31 |
| 3.1 Comportamento mecânico dos polímeros termoplásticos | 31 |
| 3.2 Comportamento reológico..... | 33 |
| 3.3 Calor e transferência de calor nos polímeros termoplásticos | 34 |
| 3.4 Escoamento do polímero durante a fase de enchimento..... | 34 |
| 3.5 Tensão de corte do fluxo | 35 |
| 3.6 Compressibilidade do fundido..... | 37 |
| 3.7 Simulações CAE aplicadas à indústria dos moldes..... | 38 |
| 3.7.1 Vantagens | 40 |
| 3.7.2 Desvantagens | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.7.3 | Tipos de malha | 41 |
| 3.8 | Princípios e modelos de orientação das fibras do material compósito de matriz polimérica | 42 |
| 3.8.1 | Modelo tradicional da orientação das fibras | 43 |
| 3.8.2 | Modelo de Halpin-Tsai | 45 |
| 3.8.3 | Modelo de Mori-Tanaka | 46 |
| 4 | METODOLOGIA IMPLEMENTADA..... | 48 |
| 4.1 | Simulações Numéricas..... | 50 |
| 4.1.1 | Procedimento para o estudo reológico com o Moldex3D | 51 |
| 4.1.2 | Configuração de dados no Moldex3D | 53 |
| 4.2 | Trabalho experimental | 54 |
| 4.2.1 | Ensaio DMA..... | 54 |
| 4.2.2 | Ensaio DSC | 58 |
| 4.2.3 | Dureza shore em escala D..... | 60 |
| 4.2.4 | Ensaio de densidade pela norma ASTM D792-00..... | 61 |
| 4.2.5 | Ensaio de tração segundo a norma ASTM D638-14 | 62 |
| 4.2.6 | Ensaio de flexão..... | 63 |
| 5 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 65 |
| 5.1 | Simulações reológicas de polímeros com fibras..... | 65 |
| 5.2 | Resultados do trabalho experimental | 66 |
| 5.2.1 | DMA..... | 66 |
| 5.2.2 | DSC..... | 67 |
| 5.2.3 | Dureza Shore-D..... | 68 |
| 5.2.4 | Ensaio de densidade | 69 |
| 5.2.5 | Ensaio de tração..... | 69 |
| 5.3 | Comparação entre as simulações numéricas e o trabalho experimental | 70 |
| 5.3.1 | Sentido do fluxo de enchimento analisado ao microscópio ótico..... | 71 |
| 5.3.2 | Orientação das fibras segundo o cálculo numérico | 72 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 74 |
| 6.1 | Para trabalhos futuros: | 75 |
| | Referências bibliográficas..... | 77 |
| | ANEXOS..... | 83 |
| | Anexo A..... | 83 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de uma máquina de injetar de parafuso | 6 |
| Figura 2 - Ciclo de moldação por injeção (manual do projetista para moldes de injeção de plástico) | 8 |
| Figura 3 - Fecho do molde e injeção do plástico | 8 |
| Figura 4 – Pressurização | 9 |
| Figura 5 - Plasticização e arrefecimento | 9 |
| Figura 6 - Abertura e extração da peça..... | 9 |
| Figura 7 - Evolução da temperatura ao longo de um ciclo de moldação | 11 |
| Figura 8 - Esquemática da pressão de injeção..... | 12 |
| Figura 9 - Visualização da dosagem, almofada e início da 2ª Pressão (Peças, Almeida, & Henriques, 2003) [15] | 13 |
| Figura 10 - Área projetada por uma peça, sobre a bucha do molde..... | 14 |
| Figura 11 - Evolução da pressão no interior da cavidade do molde | 16 |
| Figura 12 - Molécula de etileno | 18 |
| Figura 13 - Molécula de Polietileno | 19 |
| Figura 14 - Consumo de plásticos por processo | 19 |
| Figura 15 - Família dos polímeros: A formação dos plásticos e o processo de polimerização | 20 |
| Figura 16 - Microestrutura de vários plásticos, efeito de aquecimento e arrefecimento durante o processamento | 21 |
| Figura 17 - Fases de um material compósito | 26 |
| Figura 18 - Classificação de matérias compósitos segundo o reforço..... | 30 |
| Figura 19 - Curva tensão-deformação | 32 |
| Figura 20 - Camada solidificada nas paredes do molde..... | 35 |
| Figura 21 - Distribuição da taxa de corte..... | 36 |
| Figura 22 - Orientação molecular ao longo da espessura da peça..... | 36 |
| Figura 23 - Comportamento do fluxo e respetivas características segundo a variação da espessura..... | 37 |
| Figura 24 - Representação esquemática da dependência do volume específico em relação à pressão e temperatura..... | 38 |
| Figura 25 - Tipos de elementos para malha [35] | 41 |
| Figura 26 - Boundary Layer Mesh (BLM) [32] | 42 |
| Figura 27 - Deslocação da fibra segundo o vetor P | 43 |
| Figura 28 - Seleção das opções de orientação das fibras [32] | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - Esquema das fibras e matriz de polímeros no modelo para compósitos de Halpin-Tsai..... | 46 |
| Figura 30 - Perspetivas do projeto do molde elaborado em Solidworks..... | 48 |
| Figura 31 - Molde para os ensaios de injeção | 49 |
| Figura 32 – a) Diferença entre moldação por CAE e b) moldações reais obtidas | 50 |
| Figura 33 - Seleção do modo de cálculo da malha no Moldex3D [36] | 51 |
| Figura 34 - Passos para elaboração da malha | 52 |
| Figura 35 - Passos para elaboração da malha BLM | 52 |
| Figura 36 - Parâmetros inseridos na máquina de injeção | 53 |
| Figura 37 - Dados verificados após inserção dos parâmetros de injeção no moldex3D .. | 54 |
| Figura 38 - Constituição da máquina DMA (a) e Ondas sinusoidais aplicadas (b) | 55 |
| Figura 39 - Oscilação Forçada (a) e Oscilação Livre (b)..... | 56 |
| Figura 40 - Comportamento de E' e $\tan \delta$ típico para um polímero semi-cristalino, a e c referem-se à fase amorfa e cristalina | 57 |
| Figura 41 - Amostras dos provetes cortadas para a geometria pretendida ao ensaio DMA (a) e respetiva equipamento do ensaio Triton 2000 DMA da Triton Technology (b)..... | 58 |
| Figura 42 - (a) Componentes em análise na Máquina DSC, (b) Representação esquemática da secção transversal de um equipamento de DSC da DuPont | 58 |
| Figura 43 - Amostra a aplicar no ensaio (a) e máquina de ensaio DSC 131 da SETARAM Instrumentation (b) | 59 |
| Figura 44 - Medidor de dureza shore do laboratórios de Eng ^a Mecânica da ESTG | 60 |
| Figura 45 - Pesagem da amostra inserida no gobelé | 61 |
| Figura 46 - Amostras obtidas dos provetes de PPGF20%..... | 62 |
| Figura 47 - Máquina de ensaios mecânicos Zwick Z100 | 63 |
| Figura 48 - Ensaio de Flexão em provetes de flexão..... | 64 |
| Figura 49 - Gráfico obtido em ensaio de flexão | 64 |
| Figura 50 - Análise da representação gráfica do ensaio | 66 |
| Figura 51 - Gráficos das curvas de aquecimento e arrefecimento da amostra granulo de matéria prima PPGF20%..... | 67 |
| Figura 52 - Gráficos das curvas de aquecimento e arrefecimento da amostra pequeno pedaço de um provete PPGF20% | 68 |
| Figura 53 - Proвете 1 de tração com os pontos de medição obtidos..... | 68 |
| Figura 54 - Proвете 2 de tração com os pontos de medição obtidos..... | 69 |
| Figura 55 - Gráfico dos provetes de tração..... | 70 |
| Figura 56 - Sentido do fluxo de enchimento analisado no provete 1 por microscópia ótica (objetiva 10x)..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 57 - Sentido do fluxo de enchimento analisado ao microscópio com o aumento a 10x no provete 2..... | 71 |
| Figura 58 - Fluxo e orientação das fibras através do estudo CAE em moldex3D | 72 |
| Figura 59 - Orientação das fibras no moldex3D por cálculo de malha normal (à esquerda) e por cálculo de malha BLM (à direita)..... | 72 |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Fatores que influenciam a pressão de injeção (Shoemaker, 2006) | 17 |
| Tabela 2 - Classificação das estruturas e relevantes propriedades dos termoplásticos e termoendurecíveis | 22 |
| Tabela 3 - Estruturas e propriedades de polímeros amorfos e cristalinos | 25 |
| Tabela 4 - Efeitos de aditivos, cargas e reforços nas propriedades do polímero..... | 27 |
| Tabela 5 - Diferenças existentes nos métodos de orientação da fibra na anisotropia do material..... | 45 |
| Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de Densidade às amostras obtidas por injeção plástica | 69 |
| Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração | 70 |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas e símbolos

2D – Duas dimensões

2,5D – Duas dimensões e meia

3D – Três dimensões

A – Área

ABS – Acrilato Butadieno Estireno

Al₂O₃ – Oxido de alumínio

A_p – Área projetada

ARD – Anisotropic Rotary Diffusion

ARD-RPR – Anisotropic Rotary Diffusion - Retarding Principal Rate

ASTM – American Society for Testing and Materials

BLM – Boundary Layer Mesh

C – Carbono

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CS – Coeficiente de Segurança

DMA – Dynamic Mechanical Analysis

DSC – Differential scanning calorimetry

D^t – Densidade do Material à Temp. Ambiente

DTA – Differential thermal analysis

E – Módulo de Elasticidade ou Modulo de Young

E' – Módulo da componente em fase

E'' – Módulo da componente desfasada (módulo de perda)

F – Força

FEM – Finite Element Method

F_f – Força de Fecho

FT – Folgar-Tucker

h – Espessura

H – Hidrogénio

HS – Hard Shore
iARD – Improved Anisotropic Rotary Diffusion
IRD – Isotropic Rotary Diffusion
ISO – International Organization for Standardization
Km – Constante do Material
kN – QuiloNewton
LCPs – Polímeros de cristais líquidos
m - Massa
MFI – Melt Flow Index
MFR – Melt Flow Rate
mN – miliNewton
MVR –Melt Volume Rate
M^a – Peso Molecular
N_{Cav} – Número de cavidades
P – Pressão
P.V.T. – Pressão Volume Temperatura
Pa.s – Pascal por segundo
PC – Policarbonato
PE – Polietileno
PEEK – Polyether ether ketone
PET – Polietileno tereftalato
Pinj – Pressão de Injeção
Pm – Pressão Média de injeção
PP – Polipropileno
PS – Poliestireno
 $\rho_{H_2O}^t$ – massa volúmica da água à temperatura ambiente
Q – Caudal
SiO₂ – Dióxido de Silício
Tan δ – Ângulo de Fase
Tf – Temperatura do ponto de fusão
T_g – Transição Vítrea
w – Largura

ΔP – Variação de Pressão

ε – Alongamento

η – Viscosidade Intrínseca

θ – Ângulo entre o eixo Z e o plano XoY

σ – Tensão

ϕ – Ângulo entre os eixos X e Y

Ψ – Probabilidade de encontrar fibra

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Durante o século XIX, em 1868 John Wesley Hyatt desenvolveu maneira de fazer bolas de bilhar injetando *celluloid* num molde, foi a primeira vez que se processava um termoplástico artificial num molde. Sendo o *celluloid* um composto de nitrocelulose e cânfora desenvolvido entre 1860 e 1870, e um dos primeiros termoplásticos a serem processados para várias aplicações como filmes para a indústria cinematográfica e de fotografia, artigos domésticos, de *toilette*, de decoração, material de escritório e para instrumentos musicais como as teclas de pianos e carcaças de acordéons. Em 1872 os irmãos John e Isaiah Hyatt patentearam a primeira máquina de fusão e mistura de polímeros capaz de moldar termoplástico por injeção. Esta máquina usava um pistão aquecido para derreter os polímeros e obrigar o plástico a ser injetado no molde.

Mais tarde em 1946, James Hendry deu o impulso para melhorar o processo de injeção aplicando um fuso rotativo para misturar e derreter o material na máquina de injeção que inventou. Desde então grande parte das máquinas de injeção contam hoje com o aperfeiçoamento dos seus fusos de injeção, contando com várias patentes em funcionamento, diversos destinos para os mesmos e também, atualmente, detêm a capacidade de laborar com energia elétrica, de grande capacidade de produção e quase autónomas no que toca à produção em série [1-5].

Durante a II Guerra Mundial houve a necessidade de utilizar outros materiais como o acrílico, o polietileno, o nylon, o neoprene e entre outros polímeros substitutos aos produtos naturais que se estavam limitados naquela época.

Perante esta guerra mundial, a indústria dos polímeros obteve uma grande expansão, mostrando-se uma fonte infindável de produtos que substituíram e substituem os produtos naturais.

Com o término da II Guerra mundial, a evolução da indústria de polímeros manteve-se em constante prosperidade, continuando em grande desenvolvimento desde a descoberta do polietileno em 1953 por Karl Ziegler e do polipropileno em 1954 por Giulio Natta, ambos os químicos premiados com o prémio nobel da química pelas suas descobertas em 1963.

Entre a década de 1950 e 1960, o desenvolvimento e fabrico de moldes de injeção de plástico em Portugal passa a ser uma indústria de grande importância, fomentada pela Anibal H. Abrantes, Lda (grupo Iberomoldes) e pelas mais antigas empresas do fabrico de moldes da região de Leiria. Também é de notar que na região norte do país dentro das mesmas décadas esta indústria teria sido estimulada pelas empresas Moldoplástico e pela Simoldes Aços, Lda [6].

No que concerne aos materiais poliméricos em si, ainda durante o século XIX, foram descobertos mais de sessenta elementos químicos, constituintes dos materiais [7]. A análise dos materiais sofreu uma revolução no séc. XX com a ajuda do microscópio eletrónico, realizando-se sistemáticos estudos progredindo na descoberta de novos materiais, novos processos de fabrico e transformação. Como tal, a partir daqui surge a Ciência dos Materiais e a Engenharia de Materiais [8].

Hoje, na Engenharia de Materiais existem cinco grandes grupos: os metais, as cerâmicas, os polímeros, os semicondutores e os compósitos, constituindo assim o cenário industrial moderno que dispõe de aproximadamente 50.000 materiais [8]. Antigamente, o ser humano aglomerava diferentes materiais com o propósito destes adquirirem melhores propriedades (por exemplo: a resistência mecânica), sem sequer se preocupar com processo físico-químico gerado na origem do material. Durante séculos, as competências dos materiais compósitos mantiveram-se inexploradas, pois, os materiais homogêneos ou monolíticos serviam a maioria das necessidades tecnológicas. No século XX surge uma nova geração de materiais compósitos reforçados com fibras impulsionada pela indústria aeronáutica. Os materiais compósitos reforçados com fibras tiveram início num conjunto de desenvolvimentos técnicos e científicos, advêm com o descobrimento de materiais orgânicos sintéticos, derivados de origem de vegetal e de carvão. Por exemplo, em 1943, a fuselagem traseira de um avião foi construída com recurso a poliéster reforçado com fibras de vidro [9].

Atualmente a maioria das indústrias utiliza os benefícios dos materiais compósitos e exemplos disso são a indústria automóvel, a indústria de equipamentos desportivos e de recreio, a indústria da construção civil, a indústria aeroespacial, sistemas domésticos, etc. [10, 11].

Na indústria de polímeros, os compósitos de matriz polimérica têm uma grande importância à escala mundial, pois é uma indústria que continua em crescimento e desenvolvimento, movimenta a economia mundial, gera postos de trabalho e conhecimento aos recursos

humanos, mais procura pelas matérias-primas para as ferramentas de injeção, desenvolvimento de mais e melhor tecnologia aplicada aos processos de fabrico assim como ao avanço da engenharia e da ciência de materiais.

1.2 OBJETIVOS

O processamento de termoplásticos por injeção é uma área tecnológica de grande importância para fabrico de componentes plásticos e de peças técnicas para diversas indústrias. As peças plásticas processadas, com geometrias simples ou complexas, podem ser obtidas a partir de um único material termoplástico ou da conjugação de vários materiais com sistemas de alimentação mais complexos, além disso, os materiais compósitos de matriz polimérica utilizados nesta indústria de injeção de polímeros têm um processo de plasticização igual. A diferença existente nestes compósitos é destacada pela presença dos chamados reforços de vários tipos como a fibra de vidro, fibra de carbono, partículas metálicas, partículas minerais e talcos. Como tal, para este projeto foram estabelecidos os dispostos objetivos:

- Estudo do estado da arte do processamento de compósitos de matriz termoplástica por injeção;
- Análise e medições ao molde de injeção de provetes de tração e flexão da ESTG, para posterior processo de injeção;
- Modelação 3D do molde usado na injeção do compósito de matriz polimérica com recurso ao *software* CAD Solidworks na ESTG;
- Através do *software* CAE Moldex3D simular o processo de injeção do molde modelado em CAD;
- No que concerne ao enchimento, compactação, refrigeração e contração do artigo a moldar na simulação CAE, pretende-se também observar a orientação das fibras de vidro do compósito de matriz polimérica de modo a que, posteriormente, esta simulação seja comparada com provetes processados;
- Análise e verificação de casos de estudo referentes à orientação de fibras nos compósitos de matriz polimérica;
- Efetuar ensaios de injeção do compósito de matriz polimérica, com molde analisado, nos laboratórios de Eng^a Mecânica e utilizando os parâmetros já definidos na simulação efetuada no *software* CAE Moldex3D;
- Realizar ensaios de tração, flexão, densidade, dureza shore, DMA, DSC e observação da direção do fluxo e das fibras ao microscópio;
- Caracterização comparativa da simulação CAE com a real orientação das fibras;

- Conclusões retiradas com a elaboração deste projeto.

1.3 ESTRUTURA

O disposto projeto está dividido em o seis Capítulos. No primeiro Capítulo é apresentado o tema deste trabalho, expostos os objetivos considerados e estrutura. No segundo Capítulo é apresentado o estado da arte relativo ao processamento materiais termoplásticos (e compósitos de matriz polimérica) ostentando revisão bibliográfica sobre a máquina de injeção em geral, considerações a ter em linha de conta num projeto de moldes em relação à máquina com o material a ser processado, parâmetros de injeção, parâmetros a características do material a processar e tempos de uma máquina de injeção. Assim como é feita a caracterização dos polímeros, compósitos de matriz polimérica e principais reforços existentes para a formação destes compósitos. O terceiro Capítulo transmite e caracteriza os fenómenos reológicos no processo de injeção de termoplásticos. Contem uma breve referencia ao modelo CAD realizado para este projeto de dissertação e contextualiza os modelos da orientação das fibras utilizados no Moldex3D. No quarto Capítulo foram expostos os procedimentos experimentais elaborados tanto ao nível das simulações numéricas CAE usadas, assim como os processos laboratoriais utilizados em laboratório. No quinto Capítulo são discutidos os resultados obtidos com o Moldex3D e nos processos feitos em laboratório. No sexto Capítulo são apresentadas as conclusões adquiridas com a elaboração deste projeto, assim como a envolvente do projeto na composição de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão analisados conteúdos de natureza científica e tecnológica enquadrados no presente estudo. Será abordado o processo injeção de termoplásticos dada a sua relevância na produção de peças plásticas e que é atualmente um dos meios mais utilizados pela indústria para criação de produtos poliméricos. Permitindo a produção de uma vasta gama de produtos plásticos, devido à sua capacidade de produção de peças com formas e geometrias complexas, elevada precisão dimensional, bom acabamento superficial, boas características mecânicas, aplicação para fins estruturais, estéticos ou com o propósito de substituir produtos de outro tipo de materiais, aliando todas estas vantagens a curtos ciclos de produção.

2.1 PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO

A moldação por injeção pode ser definida como um processo em que um material plástico, adquirido em forma de grânulos sólidos do tipo de termoplástico a usar, é carregado numa máquina onde, sequencialmente, com o aquecimento é fundido e sob pressão é introduzido num molde. No molde, o material fundido preenche a impressão respetiva e arrefece recuperando a sua rigidez.

2.1.1 MÁQUINA DE INJEÇÃO PARA A INDÚSTRIA DO PLÁSTICO

A máquina de injeção de fuso consiste numa estrutura rígida que, de um lado, suporta o mecanismo de abertura e aperto do molde, e do outro, um cilindro aquecido que no seu interior existe um fuso onde polímero é fundido.

A rotação do fuso pode ser acionada por um motor elétrico ou por um motor hidráulico consoante o tipo de máquina ou marca. O movimento de avanço do fuso é garantido por um cilindro hidráulico e refluxo de material para o canal do fuso é evitado por meio de uma válvula de não retorno.

Existem diferentes tipos de máquinas no mercado, mas os equipamentos funcionais que as compõem são praticamente os mesmos, sendo apresentado na figura 1 um esquema de uma máquina de injeção onde se identificam os principais equipamentos funcionais.

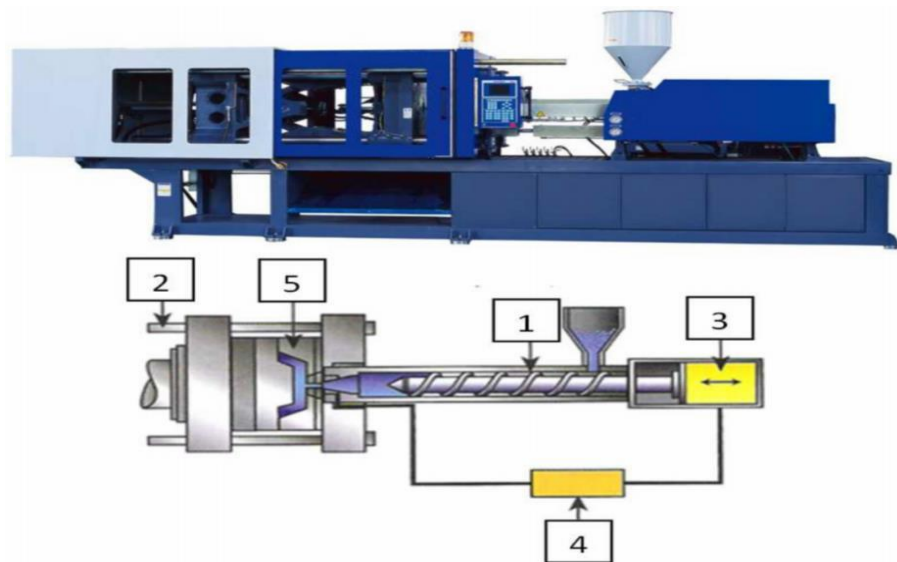


Figura 1 - Esquema de uma máquina de injetar de parafuso [12].

As funções dos equipamentos integrantes de uma máquina de injeção são os seguintes:

1. Unidade de injeção: Faz o transporte, aquecimento, fundição e homogeneização do material desde a base da tremonha até ao bico de injeção. Realiza também a chamada segunda injeção ou compactação, compactando do fundido.

2. Unidade de fecho: Permite a fixação do molde e a movimentação do lado móvel do molde, mantendo o molde fechado durante as fases de injeção e de compactação. Tem integrado os dispositivos necessários à extração das peças moldadas em sintonia, geralmente com o lado móvel do molde.

3. Unidade de potência: Gera a energia necessária aos diversos atuadores da máquina. Normalmente trata-se de um sistema electro-hidráulico, onde é acionada uma bomba por meio de um motor elétrico.

4. Unidade de controlo: É a interface entre o operador e a máquina de injeção, permite a introdução e seleção dos parâmetros de injeção garantindo a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo dando consistência e repetibilidade na produção do produto.

5. Molde: O processo de moldação por injeção implica a existência de um molde que é uma ferramenta que define a geometria do produto final. É constituído, geralmente, por

duas partes que são mantidas fechadas durante os períodos de injeção e subsequente arrefecimento, abrindo posteriormente na altura da ejeção da peça moldada.

O processo de injeção de plásticos é realmente complicado, pois os parâmetros aplicados ao processo são imensos. Conseguir reconhecer e ter completo domínio destas variáveis é fundamental para se garantir uma produção de peças de qualidade [12].

2.1.2 MOLDE PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICO

O molde de injeção é um conjunto de sistemas funcionais que possibilitam a existência de um espaço definido pela cavidade e pela bucha, onde nesse espaço em vazio o material fundido entra e preenchendo-o, em condições controladas e com o auxílio de outros sistemas, dá origem a uma peça ou produto com garantia de qualidade dimensional e estrutural. Estes sistemas funcionais são:

- A estrutura, que certifica a estabilidade estrutural do molde;
- O guiamento, que mantém alinhamento da cavidade com a bucha;
- A alimentação (gito, canais de alimentação e ataques à peça), que permitem o percurso do fundido, desde o bico da Máquina injetora até à impressão;
- Controlo de temperatura, garantindo que as superfícies moldantes possuam uma temperatura tão uniforme quanto possível e que o arrefecimento da peça seja feito de forma rápida e eficiente;
- A extração, tem como função retirar a peça do molde.

2.2 CICLO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO

A moldação por injeção é um processo cíclico. O conjunto de operações necessário à produção de uma peça moldada designa-se por ciclo de moldagem. A otimização do ciclo de moldação é fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, dado o elevado investimento em capital requerido para a instalação deste tipo de equipamento (máquina de injeção, molde e equipamentos auxiliares).

Na figura 2 podemos observar esse carácter cíclico do processo de injeção e as diversas

fases que o compõem [13].

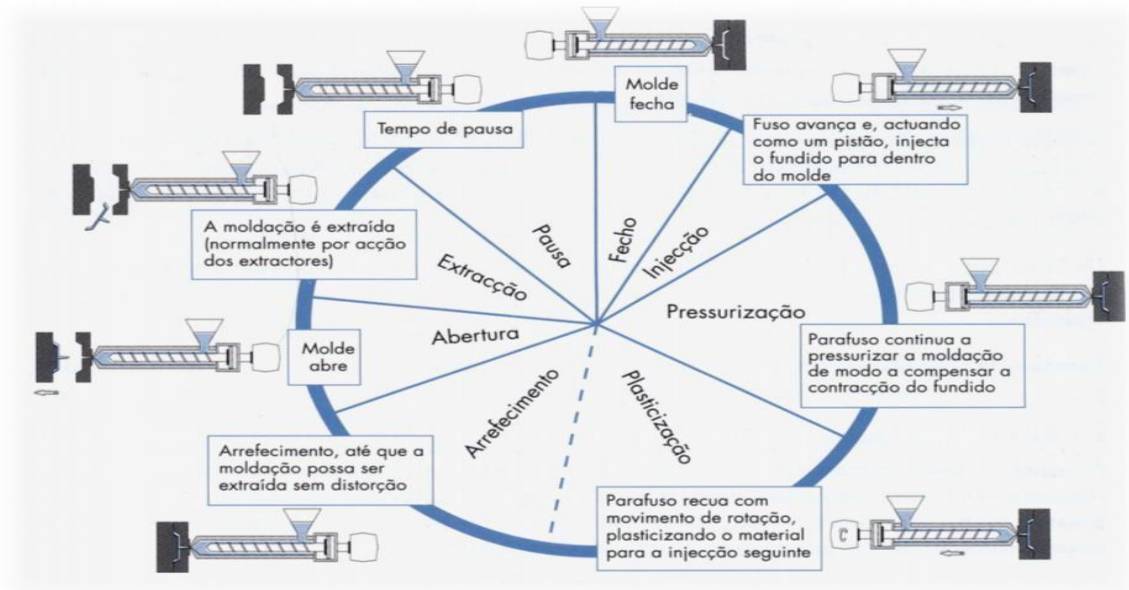


Figura 2 - Ciclo de moldação por injeção (manual do projetista para moldes de injeção de plástico) [13].

Analisando esquematicamente as diferentes etapas num ciclo de moldação:

a) Fecho do molde e injeção do plástico

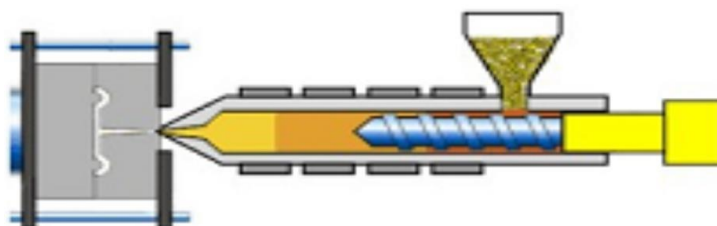


Figura 3 - Fecho do molde e injeção do plástico [14].

O fuso empurra sem rodar o material fundido para o molde que está à temperatura indicada pelo fabricante do material. O ar é expelido por um sistema de fuga de gases conforme o projeto do molde elaborado.

b) Pressurização

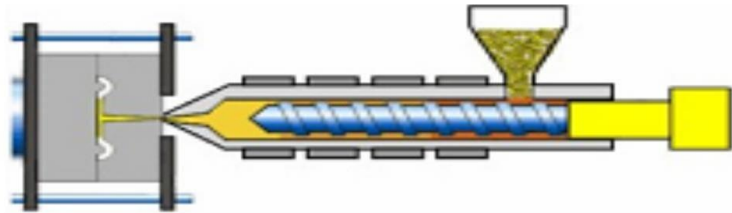


Figura 4 – Pressurização [14].

As cavidades estão cheias, mas o fusão continua a pressionar, ou seja, é dada a segunda pressão ou pressão de compactação, para compensar vazios ou falta de material e contrações do material.

c) Plasticização e arrefecimento

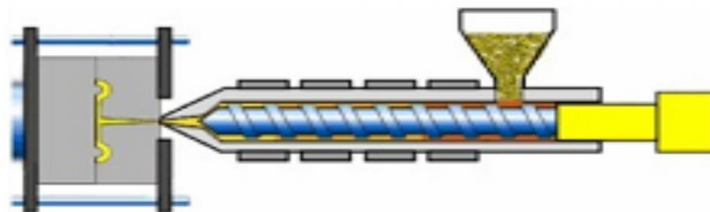


Figura 5 - Plasticização e arrefecimento [14].

Com o canal solidificado, não é possível introduzir mais material, então o fusão começa a rodar em sentido oposto e introduz-se plástico granulado na tremonha. À medida que o fusão roda, o material funde para o próximo ciclo.

d) Abertura e extração da peça

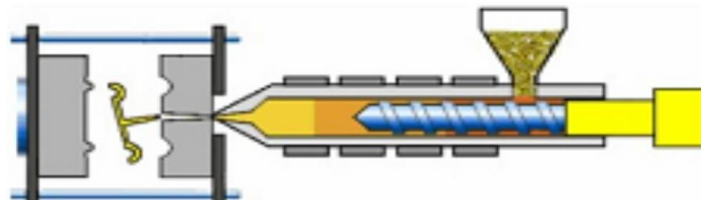


Figura 6 - Abertura e extração da peça [14].

O molde abre e com auxílio do hidráulico de extratores a peça é extraída e então fecha-se o molde e inicia-se um novo ciclo de injeção [14].

2.3 PARÂMETROS UTILIZADOS NA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

Existem 3 tipos de parâmetros de injeção: os operatórios, os do processo e os do material.

Os **variáveis e parâmetros operatórios** são aqueles que podem ser alterados no decorrer da fase de testes ao molde, com o objetivo de encontrar a solução ideal para fabricar peças de boa qualidade.

Os **parâmetros do processo** são escolhidos durante a fase de projeto do molde, raramente são alterados depois do molde estar completamente contruído, no caso de ser necessário fazer alterações no molde, este volta para a produção e sofre modificações estruturais como requisitadas pelo cliente.

Os **parâmetros do material** implicam todas propriedades inerentes ao polímero a ser utilizado na injeção da peça, as propriedades são escolhidas em função da peça, no propósito ou funcionalidade da peça e segundo o material exigido pelo cliente.

2.3.1 VARIÁVEIS E PARÂMETROS OPERATÓRIOS DO PROCESSO DE INJEÇÃO

Variáveis operatórias estão diretamente relacionadas com o poder de decisão do operador da máquina de injeção, ajustam os sistemas de controlo e/ou dispositivos auxiliares de modo a que o ciclo de enchimento seja garantido com o tempo de injeção necessário a obter uma peça termoplástica de boa qualidade. As variáveis operatórias mais importantes são:

- Perfil de temperaturas no cilindro – A temperatura do material ao longo do cilindro da máquina de injeção é dado em função da potência calorífica debitada pelas resistências de aquecimento, pelo calor gerado na dissipação viscosa do material, devido ao atrito desencadeado pelas cadeias moleculares do polímero e entre o polímero e as paredes do cilindro/parafuso da máquina de injeção. O perfil de temperaturas a ser empregue na máquina, tem de ser aplicado em função do material que é injetado, da geometria do fuso e do tipo de molde a encher. A principal finalidade é a de garantir uma temperatura suficientemente elevada para assegurar a fluidez do material sem que haja a degradação do mesmo.

- Temperatura do molde – é o parâmetro elementar para o processo que determina

as principais propriedades da peça moldada, uma vez que condiciona fortemente o desenvolvimento estrutural do polímero durante a fase de arrefecimento. O tempo de arrefecimento é considerado a maior parte do tempo de ciclo de moldação, visto que é uma variável que assegura a qualidade estética e estrutural da peça. Ao longo do ciclo de moldação denota-se que a temperatura não é constante (figura 7).

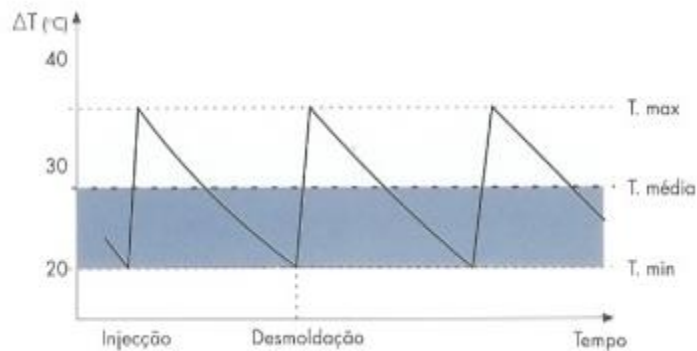


Figura 7 - Evolução da temperatura ao longo de um ciclo de moldação [13].

- Velocidade de injeção (ou escalonamento de velocidades de injeção) – é a velocidade que está inerente ao avanço do fuso durante a fase de enchimento do molde, é dada em mm/s . Corresponde assim, ao caudal com que o material já fluido é injetado, é dado em cm^2/s .

Velocidades de injeção elevadas são necessárias para assegurar uma baixa viscosidade do fundido, minimizar perdas de calor durante o enchimento e garantir uma elevada dissipação viscosa durante o escoamento. No entanto as velocidades muito elevadas na frente do fundido pode resultar em defeitos de moldação nas peças moldadas.

- Pressão de injeção – Pressão máxima que aumenta na fase de enchimento, resultante do esforço necessário para garantir o enchimento de um determinado material num molde, para um artigo de determinada configuração geométrica e à velocidade designada pelo operador da máquina de injeção.

É importante distinguir a pressão de ajuste (a pressão de injeção que é regulada pelo operador) e a pressão máxima de injeção (pressão efetiva atingida até à mudança para a fase de pressurização). Ao referir um valor de pressão no processo de injeção tem que estar em linha de conta o seu verdadeiro significado físico, pois nas máquinas hidráulicas o operador ajusta o valor da pressão de óleo e quando se está a fazer referência à pressão de injeção, esta está diretamente associada ao valor da pressão no cilindro de injeção

responsável pelo movimento do fuso. Como a área do pistão do cilindro é aproximadamente 10 vezes superior à secção transversal da ponteira do fuso (que exerce a pressão de injeção sobre o fundido), a pressão efetiva sobre o material é cerca de 10 vezes maior que a pressão de ajuste [13].

- Pressão de manutenção (segunda pressão, pós-pressão ou pressão de compactação) – Variável corresponde à pressão aplicada após a fase de enchimento estar final com intuito de compensar a contração volumétrica que o material sofre durante o arrefecimento (figura 8).

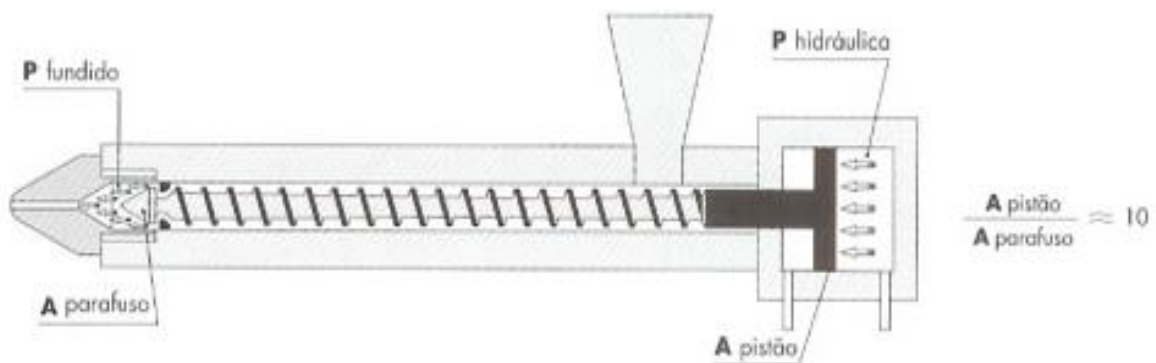


Figura 8 - Esquemática da pressão de injeção [13].

- Tempo de manutenção (ou de pressurização) – É o tempo estimado para o fuso exercer a pressão de compactação, sendo este tempo empregue após verificado o arrefecimento do ataque, ou seja, a partir do instante em que deixa de existir um fluxo de material contínuo no ataque à peça.

- Velocidade de rotação do fuso – Parâmetro importante para obter uma homogeneização adequada do fundido do material polimérico durante a plasticização. Apenas em moldações com tempos de arrefecimento curtos, são usadas velocidades de rotação do fuso elevadas.

- Contrapressão – É a pressão que se opõe ao retorno do fuso durante a injeção do material. Tem como principal função a uniformização da massa fundida no cilindro, expulsando o ar.

- Dosagem – Corresponde ao volume da moldação e à almofada, ou seja, é a quantidade de material a ser empregue na injeção completa de uma peça. A quantidade de material geralmente corresponde a um curso de dosagem entre uma a três vezes o diâmetro do cilindro de injeção (figura 9).

- Curso de decompressão – Durante a moldação fica um acumulado de material no bico que faz aumentar a pressão, sendo necessário haver uma purga de material pelo bico no final da plasticização. Para colmatar esta questão é realizado o recuo do fuso que provoca uma sucção do fundido e diminui a pressão no mesmo (figura 9).
- Almofada – Comprimento de fluxo de material que está para além da primeira e segunda pressão do fuso. É uma excelente medida associada à reprodutibilidade do processo de injeção, amortecendo as variações do processo.

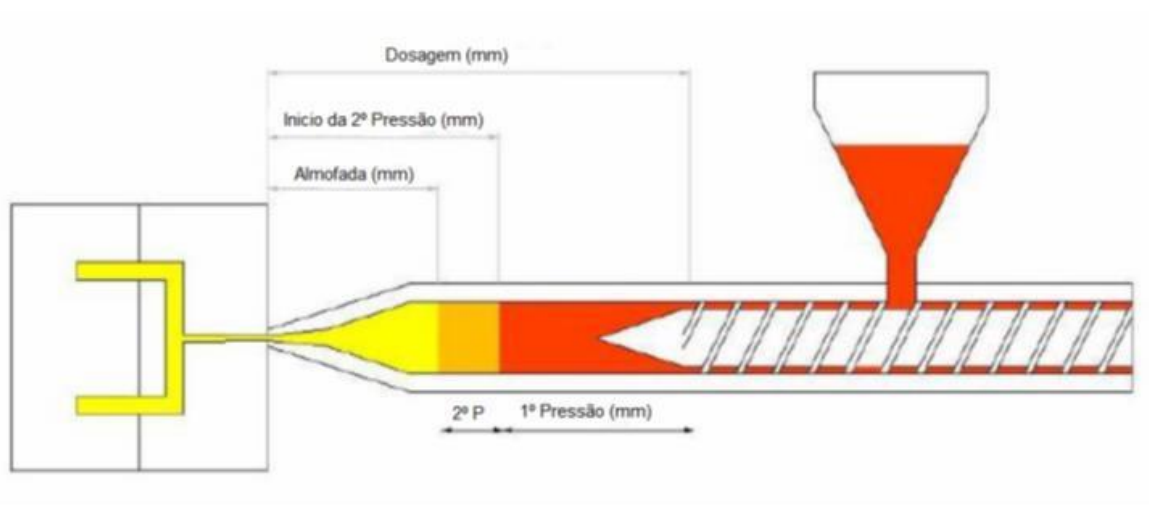


Figura 9 - Visualização da dosagem, almofada e início da 2ª Pressão (Peças, Almeida, & Henriques, 2003) [15].

- Tempo de arrefecimento – O arrefecimento da peça moldada é iniciado a quando o polímero a ser injetado entra em contacto com as paredes do molde, mas, o tempo de arrefecimento acontece após a fase de pressurização sendo o período de tempo estimado em que no molde passa o fluido de refrigeração a uma temperatura mais baixa que a do molde e que permite uma adequada extração da peça.
- Força de fecho – Consiste no esforço desenvolvido pela unidade de fecho da máquina injetora para suportar a união da parte fixa com a parte móvel do molde durante o processo, é expressa em kN ou toneladas. A foça de fecho opõe-se às pressões exercidas no eixo axial da máquina de injeção durante a fase de pressurização e adiante todo o processo de injeção. A pressão exercida pelo material a moldar sobre as paredes da zona moldante está diretamente relacionada com a área projetada da peça sobre a parede da bucha, embutida na expressão matemática da pressão $P = \frac{F}{A_p}$ (figura 10).

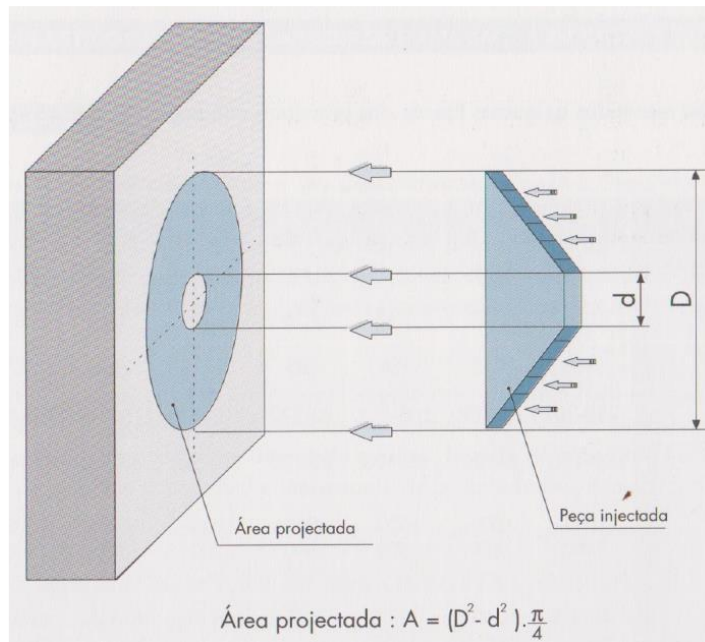


Figura 10 - Área projetada por uma peça, sobre a bucha do molde [13].

Se a capacidade da unidade de fecho da máquina for inferior à exercida pelo polímero, o molde terá tendência a abrir e a ocorrer a formação de rebarba. No normal estado de funcionamento as máquinas de injeção são ajustadas de modo a exercer uma força de fecho 20% superior à requerida para uma determinada peça a moldar. A utilização de forças de fecho elevadas ao requisitado, origina não só desperdício energético, mas também pode danificar molde. Assim, o cálculo da força de fecho necessária para uma determinada moldação é mais complexo, exigindo o cálculo da distribuição de pressões na plasticização [13]. No entanto, de forma mais aproximada à realidade, a força de fecho é calculada da seguinte forma [16]:

$$F_f = \frac{P_{inj} \times A_p \times K_m \times N_{cav} \times CS}{1000} \quad (1)$$

Em que, $1 \leq K_m \leq 2$ e o coeficiente de segurança (CS) está compreendido entre 1,10 e 1,20.

- Tempo de ciclo – Tempo total do processo produtivo de uma peça plástica, onde é exatamente o resultado da soma dos seguintes tempos inerentes ao processo de plasticização: tempo de fecho, tempo de injeção, tempo de injeção de compactação, tempo de arrefecimento, tempo de abertura do molde e o tempo do molde aberto. Quando não se inclui o tempo de extração da peça no tempo de abertura de molde, é necessário adicionar esta variável ao somatório do tempo de ciclo.

2.3.2 PARÂMETROS DO PROCESSO

Estes parâmetros são definidos durante a fase de projeto do artigo plástico, ou do molde ou de seleção dos equipamentos de injeção. Associado ao molde e ao seu fabrico existe um conjunto de parâmetros geométrico-construtivos que são determinantes no desenvolvimento do processo, mas onde o operador não tem qualquer controlo sobre esses parâmetros. Onde os mais importantes são os seguintes:

- Geometria da moldação (volume da peça, espessura da peça, comprimento de fluxo a aplicar);
- Sistema de alimentação (localização e geometria dos ataques à peça, espessura e comprimento dos alimentadores);
- Capacidade de injeção da máquina;
- Geometria do bico de injeção;
- Distribuição de temperaturas na superfície moldante.

2.3.3 PARÂMETROS DO MATERIAL

Os parâmetros do material estão associados às propriedades do polímero a injetar, como anteriormente descrito. Onde as principais propriedades da matéria-prima definem muitos dos comportamentos mecânicos no molde e do processo de injeção. Sendo que as principais propriedades da matéria prima polimérica são as seguintes:

- Viscosidade – Resistência que os fluidos apresentam à deformação, que no caso dos polímeros trata-se da resistência que o fundido tem no escoamento no molde de injeção;
- Contração do material – após a desmoldação, com a redução da temperatura para a temperatura ambiente, uma peça plástica tende a contrair ficando geometricamente mais pequena.
- Sensibilidade térmica – maior ou menor facilidade que o material tem de entrar no seu ponto de fusão;

- Anisotropia – característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção;
- Higroscopia – propriedade que certos materiais possuem de absorver água.

2.3.4 PRESSÃO DE INJEÇÃO E FATORES QUE INFLUENCIAM A PRESSÃO

A pressão de injeção empurra o material polimérico fundido para o interior da cavidade do molde durante enchimento e compactação. A figura 11 exemplifica a evolução da pressão a ocorrer no interior da cavidade.

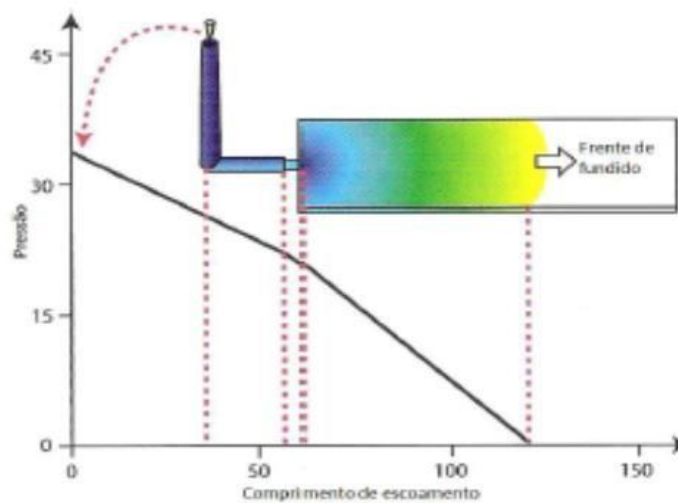


Figura 11 - Evolução da pressão no interior da cavidade do molde [17]

A pressão máxima está situada no ponto de injeção. A partir desse ponto, a pressão vai diminuindo gradualmente até valor zero, que acontece na frente do escoamento do fundido [17].

No processo de moldação por injeção, existem vários fatores que afetam a pressão de injeção, especialmente a geometria da peça, o sistema de alimentação, as condições de processamento, o tipo de material, entre outros.

A taxa de enchimento do molde é o fator que mais contribui para os níveis de pressão necessários para encher a cavidade do molde. A pressão necessária para empurrar o polímero fundido é diretamente proporcional à velocidade local do polímero. A equação 2, fundamentada na Lei de *Hagen Poiseuille*, descreve o fluxo incompressível de baixa viscosidade através de um tubo de seção transversal circular constante, esta equação











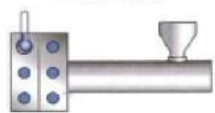
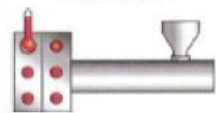






possibilita saber qual é a pressão necessária durante o enchimento do molde.

A variação de pressão necessária ΔP , é diretamente proporcional ao caudal Q e à viscosidade do polímero η . No entanto, é inversamente proporcional à largura do escoamento w , e ao cubo da espessura do canal de fluxo h .

$$\Delta P = \frac{12 \times Q \times \eta}{W \times h^3} \quad (2)$$

A tabela 1, apresenta um quadro que explica os fatores que mais afetam a pressão de injeção:

Tabela 1 - Fatores que influenciam a pressão de injeção [17].

| Factor | Variável | Maior pressão exigida | Menor pressão exigida |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|---|
| Geometria da peça | Espessura da peça | Peça fina  | Peça espessa  |
| | Superfície da peça | Mais arrefecimento e resistência das paredes  | Menor arrefecimento e resistência das paredes  |
| Geometria do sistema de alimentação | Comprimento do fluxo | Comprimento do fluxo longo  | Comprimento do fluxo curto  |
| | Dimensão do ataque | Ataque restritivo  | Ataque com maior secção  |
| | Canais do sistema de alimentação | Área reduzida do canal  | Área do canal otimizada  |
| Condições de processamento | Temperatura do molde | Baixa temperatura do fluido de arrefecimento  | Alta temperatura do fluido de arrefecimento  |
| | Temperatura do fundido | Baixa temperatura do fundido  | Alta temperatura do fundido  |
| | Velocidade do fuso | Velocidade do fuso imprópria  | Velocidade do fuso otimizada  |
| Seleção de material | Índice de fluidez | Pouca fluidez  | Elevada fluidez  |

No molde, existem zonas na cavidade sujeitas às grandes pressões de injeção e onde as propriedades dos materiais também atacam existindo assim um maior desgaste e atrito, ou seja, desgaste por abrasão. Assim sendo, nestas zonas moldantes é necessário a colocação de postiços temperados ou do mesmo aço que a cavidade ou bucha, para que ao longo do tempo possibilitem a sua substituição no caso de problemas, pois a vida do molde e a sua manutenção são fatores pensados e previstos durante a sua concepção [12, 17].

2.4 POLÍMEROS

Atualmente, os polímeros são vistos como produtos que substituem muitos dos materiais tradicionais, nomeadamente, metais e madeira. Porém, estão a ficar tão insubstituíveis como os próprios materiais tradicionais, pois detêm de uma grande versatilidade e alta capacidade de adaptação às próprias propriedades, tal não se verifica em grande parte dos outros materiais, permitindo assim solucionar problemas que outros materiais não conseguem resolver. Confirma-se que atualmente o nosso quotidiano está submisso às várias aplicações dos polímeros.

2.4.1 ESTRUTURA E PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS

A palavra polímero deriva da palavra grega poli, que significa muitos, e da palavra meros, que significa partes. Isso ocorre porque os polímeros são compostos de várias unidades menores repetidas chamadas monômeros. O monômero mais simples e mais comumente usado é o etileno. Quimicamente, ele consiste em dois átomos de carbono (C) e quatro átomos de hidrogênio (H) (figura 12). As linhas neste diagrama representam ligações que existem entre os átomos para formar uma molécula [18].

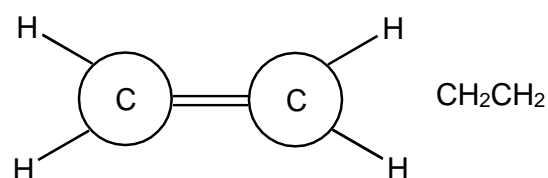


Figura 12 - Molécula de etileno [18].

É a existência da dupla ligação entre os átomos de carbono no etileno, que permite a criação do polietileno. Isso acontece quando os monômeros são combinados por um processo chamado polimerização para formar uma cadeia (figura 13). Uma cadeia de

polímero útil pode consistir em 200-2000 monômeros unidos. Este tipo particular de polimerização é chamado polimerização por adição.

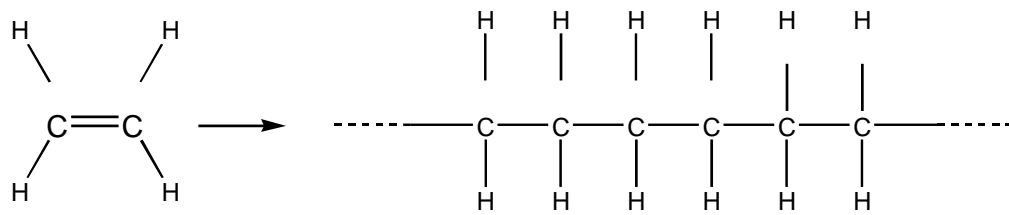


Figura 13 - Molécula de Polietileno [18].

A estrutura básica de uma molécula de polímero pode ser visualizada como uma longa cadeia de unidades repetidas, com grupos químicos adicionais formando ramos pendentes ao longo da espinha dorsal primária da molécula. Apesar do termo plástico ser empregue como sinónimo de polímero ou resina, os plásticos representam compostos poliméricos obtidos com plastificantes, estabilizadores, cargas e outros aditivos para fins de processo e desempenho. Outros sistemas poliméricos incluem borrachas, fibras, adesivos e revestimentos de superfície. Existe uma variedade de processos empregue para produzir peças plásticas finais (figura 14) [17, 18].

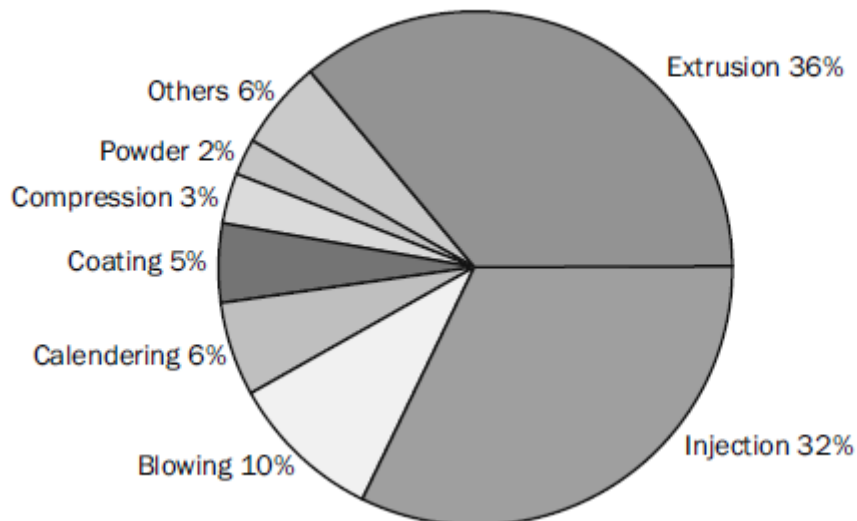


Figura 14 - Consumo de plásticos por processo [17].

O arranjo estrutural, tamanho e constituição química da molécula de polímero influenciam diretamente as propriedades físicas e químicas. A essência macromolecular dos plásticos implica que as propriedades do material também podem depender do historial mecânico e térmico que os materiais são sujeitos durante o processamento. Por exemplo, a viscosidade de um polímero fundido aumenta com o aumento do peso molecular, mas diminui com o aumento da temperatura. A orientação molecular alinhada, que resulta do forte cisalhamento exercido sobre o material, também reduz a viscosidade do polímero fundido. As propriedades físicas e mecânicas, bem como o custo dos polímeros, podem ser modificados misturando vários polímeros ou combinando-os com outros materiais ou agentes de reforço.

2.4.2 PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO

O plástico é um grupo de polímeros construído a partir de monómeros, através do processo de polimerização química (figura 15), o processamento de polímeros em produtos finais envolve principalmente alterações de fase física, como fusão e solidificação para termoplásticos ou uma reação química para termoendurecíveis [17].

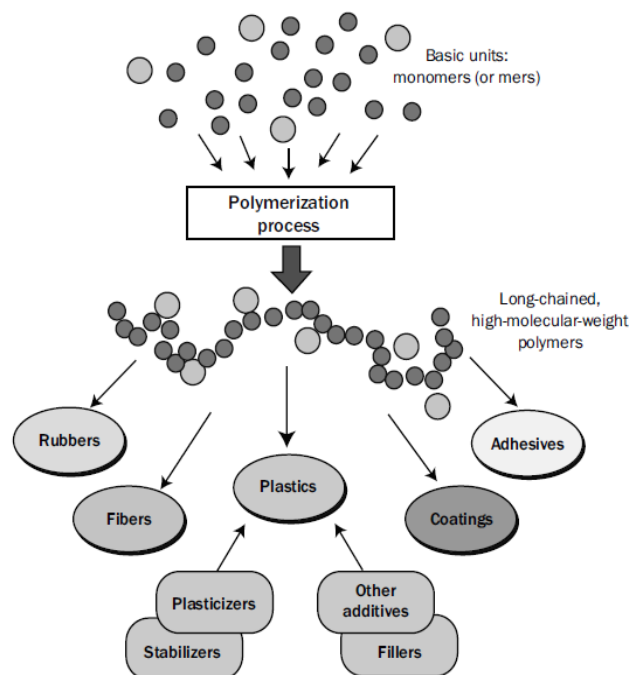


Figura 15 - Família dos polímeros: A formação dos plásticos e o processo de polimerização [17].

2.4.3 CLASSIFICAÇÃO DE PLÁSTICOS

Tendo em conta a reação química ou polimerização que liga as moléculas, os plásticos são classificados como termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros de origem natural ou sintética.

Considerando os termoplásticos e os termoendurecíveis, os termoplásticos podem ser classificados como polímeros amorfos, semi-cristalinos ou de cristais líquidos (LCPs), dependendo da sua constituição ou morfologia da cadeia polimérica. Na figura 16 pode-se observar as microestruturas destes plásticos e os efeitos do aquecimento ou arrefecimento nas microestruturas. Outras classes como os elastómeros, copolímeros, compósitos, resinas de conveniência e resinas de engenharia. Aditivos, cargas e reforços são outras classificações relacionadas diretamente às propriedades e desempenho.

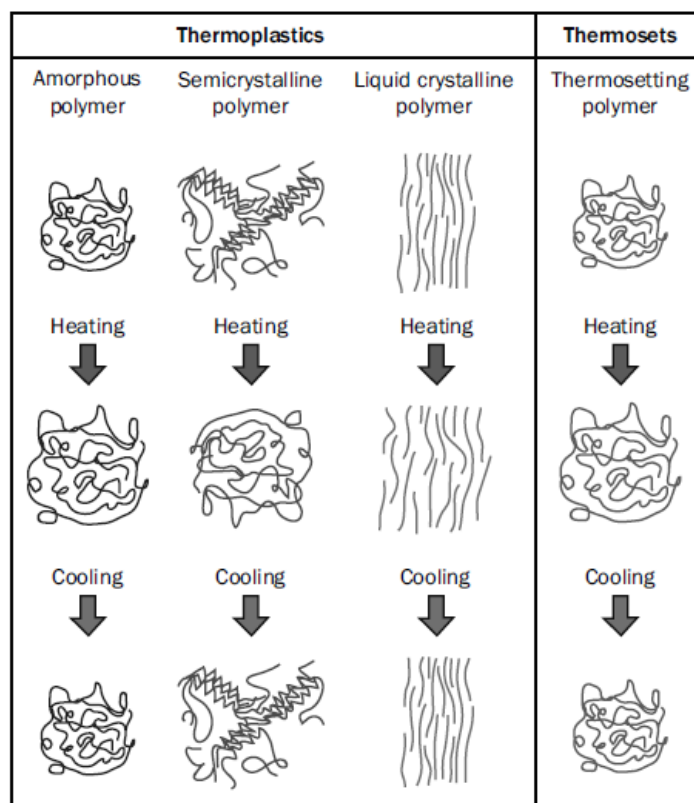


Figura 16 - Microestrutura de vários plásticos, efeito de aquecimento e arrefecimento durante o processamento [17].

A tabela 2, resumidamente, relaciona as estruturas e propriedades mais relevantes dos termoplásticos e termoendurecíveis.

Tabela 2 - Classificação das estruturas e relevantes propriedades dos termoplásticos e termoendurecíveis [17].

| | Termoplásticos | Termoendurecíveis |
|----------------------------|---|---|
| Microestrutura | Moléculas lineares ou de ramo. Sem ligações químicas entre as moléculas | Rede de ligação cruzada com ligações químicas entre moléculas após a reação química |
| Reação ao calor | Pode ser refundido (mudança de fase física) | Não pode ser refundido após ligação cruzada sem degradação |
| Propriedades gerais | Maior força de impacto. Processamento mais fácil. Melhor adaptabilidade a formas complexas. | Maior resistência mecânica Maior estabilidade dimensional. Melhor resistência ao calor e humidade. |

Termoplásticos

Normalmente os termoplásticos têm pesos moleculares altos resultantes de um elevado grau de polimerização. A longa cadeia molecular, linear ou ramificada, possui cadeias laterais ou grupos que não estão ligados a outras moléculas de polímero. Como resultado, os termoplásticos podem ser repetidamente fundidos por um aumento ou diminuição da temperatura. Este tipo de mudança de fase sem reação química permite a reciclagem de restos termoplásticos, como os gitos e os canais frios ou de alimentação, resultantes da moldação por injeção. Embora os termoplásticos sejam recicláveis, é muito provável que ocorram alterações químicas (por exemplo, oxidação ou degradação térmica) durante o processamento, pois as propriedades dos polímeros reciclados podem não ser equivalentes às do polímero virgem.

Polímeros amorfos

Moléculas de polímero fundido num estado sem tensão são orientadas aleatoriamente e entrelaçada com outras moléculas. Os materiais amorfos mantêm esse tipo de configuração molecular entrelaçada e desordenada, independentemente do estado em que se encontra.

Quando a temperatura do fundido diminui, os polímeros amorfos ficam tipo emborrachados. Quando a temperatura reduz ainda mais abaixo da temperatura de transição vítrea, estes transformam-se em materiais vítreos detendo uma ampla faixa de fundição (sem temperatura de fusão distinta), resistência moderada ao calor, boa resistência ao impacto e baixa contração. Quanto à Contração, existem dois tipos nas famílias de polímeros amorfos:

- As contrações diferenciais na direção da espessura - em que as moléculas tendem a ser desenroladas e esticadas na direção do fluxo à medida que a cavidade é preenchida. estas são extintas pelo contato com a parede fria do molde sendo solidificadas e esticadas na direção do fluxo. As moléculas em direção ao interior da peça são isoladas da parede do molde pela camada solidificada. Durante o arrefecimento, as moléculas na superfície serão orientadas e contraem menos, as moléculas no interior serão menos orientadas e haverá maior contração. A contração diferencial na direção da espessura resulta em tensões residuais induzidas pelo fluxo em plásticos moldados;

- As contrações Lineares Similares - que nas famílias de polímeros amorfos podem frequentemente ser substituídas umas pelas outras, nas mesmas cavidades de injeção, uma vez que suas retrações lineares são proporcionais. Portanto, o Poliestireno pode ser substituído pelo ABS, acrílicos podem ser moldados nas mesmas cavidades dos policarbonatos e as propriedades serão diferentes para a substituição, mas as dimensões normalmente são próximas o suficiente para estar dentro das tolerâncias especificadas [17].

Polímeros semicristalinos

Materiais cristalinos são cadeias de polímeros que não possuem grupos moleculares volumosos, ramificações em cadeia ou ligações cruzadas. Podem ser albergados numa treliça regular bem ordenada (cristal de polímero) quando os polímeros fundidos são arrefecidos abaixo da temperatura de fusão.

O processo de cristalização é interrompido quando os materiais são arrefecidos abaixo da temperatura de transição vítrea. Como é difícil conseguir uma cristalização de 100% sob condições normais de processamento, qualquer polímero cristalizável é tipicamente semi-cristalino, possuindo ambas as fases amorfo e cristalino. O grau de cristalinidade depende da estrutura química do polímero e das condições de processamento. Os polímeros cristalinos e semi-cristalinos têm um ponto de fusão distinto, boa resistência química e ao calor, boa lubrificação, baixa absorção de umidade e alta contração linear.

Esta contração linear é mais alta nos polímeros semi-cristalinos impedindo que sejam moldados nas mesmas cavidades usadas pelos plásticos amorfos, a maioria das dimensões será significativamente diferente e provavelmente perderá tolerâncias suficientes para não funcionar na mesma aplicação.

Polímeros de cristal líquido

Polímeros de cristal líquido (LCPs) exibem arranjos moleculares ordenados no estado de fusão assim como em estado sólido. São caracterizados pelas suas moléculas rígidas e de aspeto laminar que formam as matrizes ou domínios paralelos. Os LCPs oferecem uma série de vantagens de processamento e desempenho, incluindo viscosidade de baixa fusão, baixa redução da taxa de contração do molde, resistência química, rigidez, resistência ao arrastamento e estabilidade dimensional geral. A tabela 3, mostra em síntese as estruturas e propriedades mais relevantes dos polímeros amorfos e dos polímeros cristalinos [17].

Tabela 3 - Estruturas e propriedades de polímeros amorfos e semi-cristalinos [17].

| | Polímeros amorfos | Polímeros semicristalinos |
|----------------------------|---|---|
| Materiais comuns | Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Acrílico (por exemplo, PAN, PMMA) Policarbonato (PC) Poliestireno (PS) Cloreto de polivinilo (PVC) Estireno acrilonitrilo (SAN) | Acetilatos Nylon Polietileno (PE) Polipropileno (PP) Poliésteres termoplásticos (por exemplo, PBT, PET) |
| Microestrutura | Orientação molecular aleatória em fases fundidas e sólidas. | Orientação molecular aleatória na fase fundido, mas densamente compactados onde a cristalização ocorre na fase sólida. |
| Reação ao calor | Aplasticização é feita numa variedade de temperaturas (sem temperatura de fusão aparente) | Temperatura do fundido bastante distinta. |
| Propriedades gerais | Cor translúcida; Pouca resistência química; Baixa contração volumétrica no molde; Baixa resistência; Alta viscosidade do fundido; Baixa resistência ao calor. | Cor translúcida ou opaca; Excelente resistência química; Elevada contração volumétrica na plasticização; Elevada resistência; Baixa viscosidade do fundido; Maior resistência ao calor (com o aquecimento da cristalização). |

2.4.4 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Os compósitos poliméricos são materiais que incorporam certos agentes de reforço numa matriz polimérica para realçar ou obter determinadas propriedades. Para auferir maior rigidez no compósito, incorpora-se materiais com baixa proporção de aspeto, como cristais únicos ou filamentos, argila, talco ou mica do tipo flocos. Por outro lado, reforços maiores na relação de aspeto, como fibras ou filamentos de vidro, carbono-grafite, aramida e boro, aumentam a resistência à tração e a rigidez. Na figura 17, está representada a fase contínua, a fase reforço e a interface.

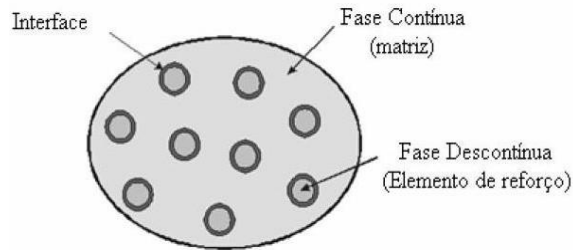


Figura 17 - Fases de um material compósito [20].

A seleção entre as várias opções de materiais, tanto da matriz como do reforço, é condicionada por inúmeros fatores, tais como, desempenho, custo, condições de processamento e disponibilidade [19, 20].

Matrizes termoplásticas

Os compósitos de matrizes poliméricas termoplásticas são designados plásticos técnicos, constituídos por macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. As macromoléculas são mantidas nas suas posições devido a ligações secundárias (forças intermoleculares). Ao aquecer o termoplástico, as ligações entre as macromoléculas são quebradas temporariamente permitindo a mobilidade molecular, o que vai permitir a reconformação, ganhando assim posições diferentes. Com um arrefecimento posterior, as moléculas vão ficar nessa posição (que tinham tomado quando aquecido), restabelecendo deste modo as ligações químicas acima referidas. Estes materiais destacam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor higroscopicidade quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. São facilmente processados por injeção ou por termoformação e podem ser reciclados. O crescimento da utilização, dos compósitos de matriz polimérica termoplástica é condicionado pela maior dificuldade em impregnar completamente os reforços [17, 19, 20].

Aditivos, cargas e reforços

Aditivos, cargas e reforços são usados para alterar e melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos plásticos. Em geral, as fibras de reforço aumentam as propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos, enquanto cargas de vários tipos aumentam o módulo, como tal, a tabela 4 mostra uma variedade de aditivos, cargas e reforços e os efeitos nas propriedades do polímero [17].

Tabela 4 - Efeitos de aditivos, cargas e reforços nas propriedades do polímero [17].

| Aditivos/Cargas/Reforços | Materiais Comuns | Efeitos nas propriedades dos polímeros |
|-----------------------------------|--|--|
| Fibras de reforço | Boro; Carbono; Minerais fibrosos; Vidro; Kevlar. | Aumento da resistência à tensão; Aumento do modulo de flexão; Aumento da temperatura de deflexão de calor (HDT); Maior resistência à contração e ao empeno. |
| Cargas condutivas | Pós de alumínio; Fibras de carbono; Grafite. | Aumentam a condutividade elétrica e térmica. |
| Agentes de ligação | Silanos; Titanatos. | Melhoram a ligação entre a matriz polimérica e as fibras. |
| Retardantes de fogo | Cloro; Bromo; Fósforo; Sais metálicos. | Reduz a ocorrência e a propagação da combustão. |
| Cargas de extensão | Carbonato de cálcio; Sílica; Argila. | Redução no custo do material. |
| Plastificantes | Líquidos monoméricos; Materiais de baixo peso molecular. | Melhoram as propriedades do fluxo do fundido. |
| Colorantes (corantes e pigmentos) | Óxidos de metais; Cromados; Carbonos negros. | Fornece rápida coloração. Proteção contra a degradação térmica ou por raios UV (com carbonos negros). |
| Agentes de sopro | Gás; Azo-composto; Derivados de Hidrazina | Geração de uma forma celular para obter um material de baixa densidade |

O reforço é o constituinte responsável pelo bom desempenho do material compósito, pois este suporta as cargas aplicadas no material obtido. De forma geral, a fase dispersa dos compósitos deve ser de elevada resistência mecânica e de elevada rigidez, para além disso, deve elevar a resistência térmica e condutividade. O reforço representa uma vantagem para o compósito, auferindo maior resistência e mais rigidez do que a matriz. Deste modo a boa interação entre matriz e reforço pode ser garantida pela criação de um interface entre ambos que conjuga a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz. Para

que o compósito apresente um bom comportamento mecânico, tal é essencial que a ductilidade da matriz seja mínima ou mesmo nula [17].

Reforços de baixo aspeto

As cargas modificam as propriedades e a moldação do composto ao qual são adicionadas. Se os reforços forem caracterizados com uma relação de aspeto baixa entre as dimensões mais longa e mais curta, as propriedades básicas serão menos alteradas das do polímero não preenchido. Os reforços beneficiam as peças plásticas das seguintes maneiras:

- A contração será menor;
- A resistência térmica é melhorada;
- Mais resistência à compressão;
- A resistência ao impacto é menor do que a de um polímero sem reforço;
- Maior resistência do solvente.

Reforços de alta aparência: fibras

Quando a proporção entre a dimensão mais longa e a mais curta da carga é grande (por exemplo, maior que 25), a carga pode ser caracterizada como uma fibra. Reforços de fibras afetam as propriedades dos compostos aos quais são adicionados. Em relação à resistência ao impacto das fibras e assumindo uma boa ligação entre a fibra e a matriz polimérica, a força na direção da fibra é maior. Se muitas fibras forem orientadas na mesma direção existe uma grande diferença entre o módulo na direção da orientação e na direção perpendicular à orientação. Este último será muito próximo ao do polímero não preenchido. Quanto à contração do material as fibras também terão um efeito significativo nas propriedades de contração do composto: a contração na direção da orientação será muito menor que a contração na direção transversal.

Importância de prever a orientação da fibra

Como a orientação da fibra varia com a direção do fluxo, na direção da espessura e nas zonas com linha de soldadura, é importante prever as orientações para determinar as propriedades do artigo moldado.

A performance dos compósitos reforçados com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz.

O arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição influenciam na resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras.

Qualificando as fibras quanto à orientação no compósito, algumas das principais configurações possíveis de observar ostentam um alinhamento totalmente aleatório, unidirecional ou bidirecional. Onde, as fibras contínuas estão alinhadas enquanto as fibras descontínuas podem estar desalinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas.

Classificando a forma do reforço ou fase dispersa no compósito, existe em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em três categorias:

- Compósitos de partículas: partículas de vários tamanhos e forma que se encontram dispersas pela matriz, exemplo do betão e do asfalto. Devido ao carácter aleatório da dispersão, estes compósitos podem ser considerados quase isotrópicos,
- Compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*): contêm fibras curtas como fase de reforço. Podem estar orientadas na mesma direção ou orientadas aleatoriamente podendo o compósito ser considerado ortotrópico ou quase-isotrópico. Exemplo, fibras de carbono, kevlar, vidro e juta (em matrizes poliméricas);
- Compósitos de fibras contínuas (laminares e sandwich): as fibras podem ser todas paralelas (fibras unidirecionais) ou formarem ângulos retos entre si (fibras cruzadas) ou orientadas em várias direções (fibras multidirecionais).

Verificando a figura 18, as fibras longas são alinhadas, enquanto as fibras curtas são alinhadas ou orientadas aleatoriamente. A resistência mecânica depende da forma das fibras, como atrás já foi referido. Como a matriz transfere a carga às fibras, estas têm de ter uma boa adesão perante a conjugação fibra/matriz. Quando aumentada a quantidade de fibra, a distribuição da tensão aplicada no compósito vai ter uma forma mais uniforme que normalmente contribui para o aumento do módulo de resistência à tração do compósito, em detrimento da deformação na rotura. Ainda assim, existe um ponto onde a resistência à tração baixa devido ao aumento da quantidade de resina ser insuficiente para manter as fibras adequadamente juntas, os compósitos com fibras alinhadas na direção de solicitação apresentam propriedades de resistência e módulo de elasticidade, que aumentam com o comprimento e teor de fibras.

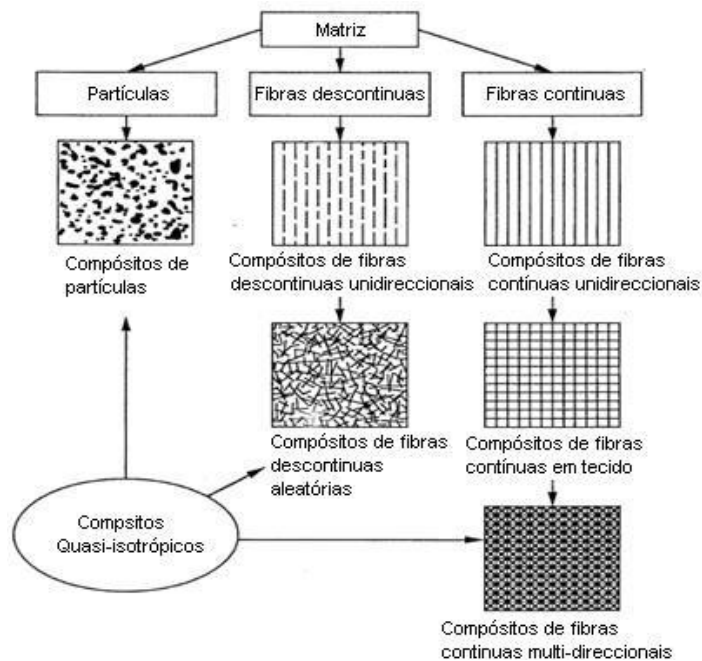


Figura 18 - Classificação de matérias compósitos segundo o reforço [20].

No caso, da solicitação ser na direção transversal o compósito apresenta uma redução das propriedades, com a resistência à tração a decrescer e o módulo de elasticidade à tração a aumentar, à medida que o conteúdo e o comprimento das fibras aumentam. A rutura ocorre na direção normal quando as fibras estão orientadas longitudinalmente, quando as fibras estão orientadas transversalmente à solicitação, a resistência oferecida pela fibra à propagação de fissuras é inferior à oferecida pela matriz [19, 20]. Num molde de injeção, a combinação de aumento da temperatura do molde com a diminuição da velocidade de injeção dá origem a uma melhor orientação das fibras na direção do fluxo do fundido [21], ou seja, as características e variáveis do processo de injeção têm grande influência na orientação das fibras.

A adesão matriz-fibra é muito importante no fabrico do compósito, sendo que a natureza do tratamento das fibras, a adição de promotores de adesão à resina, o grau de ligações cruzadas de matrizes termoendurecíveis, a temperatura de transição vítrea, T_g de matrizes termoplásticas em relação à temperatura ambiente e o grau de retração da matriz sobre as fibras durante o fabrico do compósito, são parâmetros que condicionam a adesão entre fibra e matriz.

3 FENÓMENOS REOLÓGICOS DO PROCESSO

A Reologia estuda a deformação e o escoamento de um polímero, são dois fatores diretamente influenciados pela viscosidade do material, que representa a resistência que este oferece no escoamento. No escoamento viscoso, quando é aplicada tensão, o material continua a deformar-se. Mas nos polímeros, as suas propriedades viscosas e elásticas mostram a chamada resposta viscoelástica à tensão aplicada.

A viscoelasticidade define o sucesso de qualquer operação, onde nas condições de processo é preciso ter em conta, não apenas como os polímeros fundidos se escoam, mas também como se alteram com o aumento ou diminuição da temperatura e com a solidificação e fusão do polímero. No processo de injeção feito no molde ocorre a mudança da pressão de *packing* para *holding* fazendo com que a viscosidade se altere de forma drástica. Assim sendo, mudar a pressão sempre no mesmo ponto pode ser a diferença entre produzir peças consistentes e produzir peças rejeitadas. É importante compreender que os polímeros reagem de forma diferente ao calor e a tensões aplicadas, deste modo é possível averiguar com fiabilidade quais as condições de processo mais indicadas para a modelação [18].

3.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

As propriedades mecânicas dos sólidos elásticos podem ser descritas pela Lei de Hooke conforme a equação 3, onde ao ser aplicada uma tensão ao material, observa-se uma deformação ε que lhe é proporcional, sendo a tensão independente da velocidade de deformação. Quando a tensão σ é retirada, o corpo recupera completa e instantaneamente a sua forma inicial, e em que E é o Módulo de Young, ou Módulo de Elasticidade.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3)$$

Nas propriedades dos líquidos, segundo a Lei de Newton, um fluido Newtoniano não consegue suportar deformações e a resposta instantânea a uma tensão é o escoamento viscoso. A tensão é independente da deformação, mas proporcional à velocidade de deformação, conforme se verifica na equação 4, em que η é o coeficiente de viscosidade.

$$\sigma = \eta \times \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

Os polímeros termoplásticos exibem um comportamento intermédio entre o de um sólido elástico, segundo a lei de Hooke, e de um líquido viscoso segundo a lei de Newton. Assim, apresentam frequentemente contribuição de ambos os tipos de comportamento e a predominância de carácter viscoso ou elástico da resposta a uma solitação mecânica que depende essencialmente da escala de tempo da experiência [22]:

- A aplicação de uma tensão durante um intervalo de tempo longo naturalmente provocará um escoamento viscoso, ocorrendo uma deformação permanente no polímero;

- A aplicação de uma deformação muito rápida não dá tempo às moléculas do polímero, longas e entrelaçadas, de se ajustarem à deformação aplicada, resultando numa resposta elástica.

Tanto o módulo de elasticidade E , como a viscosidade η , variam com a forma como a experiência é realizada. Este comportamento é classificado como viscoelástico. O comportamento de materiais poliméricos sujeitos a cargas pode ser estudado através de ensaios de tração uniaxial em condições normalizadas (figura 19).

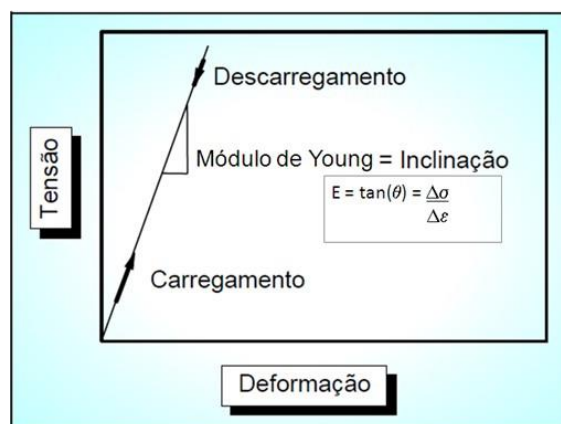


Figura 19 - Curva tensão-deformação [12].

Durante a injeção no molde, os polímeros sofrem alterações devido aos efeitos de processamento e que no próprio ato de fundir, formar e solidificar o fundido é necessário considerar três classes de propriedades:

- Processos de deformação, que permitem dar forma ao produto;
- Calor e transferência de calor, que permitem ao polímero fundir, fluir e solidificar;

- Alterações que ocorrem à estrutura e propriedades em consequência do processamento.

3.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

A estrutura molecular do polímero reflete-se na sua massa molecular, pode ser estabelecida indiretamente com a medição da viscosidade [cm³/g] através de um viscosímetro capilar. A viscosidade define-se pela resistência que um fluido (neste caso o polímero fundido) oferece ao escoamento, num determinado espaço ou passagem [23].

A resistência da viscosidade é uma função da massa molecular do polímero, ou seja, polímeros com grande massa molecular têm maior viscosidade intrínseca e vice-versa [24].

A correlação entre a viscosidade intrínseca (η) [Pa.s] e a massa molecular média (M) do material pode ser expressa pela equação de Mark-Houwink (equação 5).

$$[\eta] = K \times M^\alpha \quad (5)$$

M pode assumir diferentes designações como Mn (massa molecular numérica), Mw (peso molecular) ou Mv (massa molecular viscosimétrica), dependendo do método de determinação [12, 25, 26].

A análise da viscosidade de um material polimérico facilita no estudo do seu historial térmico, ou seja, a degradação térmica originada pela repetibilidade dos ciclos térmicos anteriores. Para o material manter as suas características e o bom desempenho, a diferença entre a viscosidade do material analisado e a viscosidade do material virgem não deve configurar uma queda superior a trinta por cento [24].

O comportamento reológico de um polímero, em contexto industrial, é caracterizado pelo índice de fluidez (MFI) ou designado por rácio de fluidez (MFR) [27, 28].

O MFI quantifica a porção de material que flui através do orifício do tubo capilar do instrumento de medida, sob aplicação de uma carga e temperatura constantes, durante um determinado tempo. O resultado é normalmente traduzido em g/10min. Quanto menos viscoso o polímero nas condições de ensaio, maior será a quantidade de polímero que flui e, por consequente, maior será o MFI do mesmo. Através da quantidade de massa que flui

através do capilar é possível prever de forma simples e rápida o comportamento reológico do material fundido durante o processo de injeção [29].

O índice de fluidez pode também ser expresso em volume (MVR), traduzindo o volume de material fundido que flui através do capilar, sob a aplicação de uma carga e temperatura constantes, durante 10 minutos. Este parâmetro é normalmente expresso em $\text{cm}^3/10\text{min}$ [28].

Atendendo à dependência que a viscosidade apresenta relativamente à massa molecular, o MFI é uma forma indireta de quantificar a massa molecular de um polímero e uma medida do inverso da viscosidade do fundido. Valores elevados de MFI estão assim associados a polímeros de baixa massa molecular e maior fluidez no processo de injeção.

Na indústria a determinação do MFI é frequentemente utilizado como meio de controlo reológico da matéria-prima comprada ao fornecedor [28, 30].

3.3 CALOR E TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Um termoplástico só poderá fluir quando aquecido:

- Acima do seu ponto de fusão (T_f), se for um material cristalino;
- À sua temperatura de transição vítrea (T_g), se for um termoplástico amorfo.

Ao passar o ponto de fusão, a viscosidade irá diminuir com o aumento da temperatura, mesmo que varie de material para material. Eventualmente os materiais podem chegar a um ponto em que ficam termicamente instáveis e acabam por se degradar. Esta degradação provoca a descoloração do fundido, tornando-se amarelo ou castanho. E com aquecimento excessivo, os polímeros entram em decomposição [18].

3.4 ESCOAMENTO DO POLÍMERO DURANTE A FASE DE ENCHIMENTO

Admitindo o molde fechado e o escoamento do fundido a partir do bico de injeção. O material fundido a injetar vai encher o gito, os canais de alimentação e em contínua para a cavidade do molde. O fundido ao entrar em contacto com a parede do molde, que se encontra a uma temperatura inferior, arrefece e solidifica rapidamente, enquanto o centro do escoamento permanece fundido. Injetando mais material, o material já existente é obrigado a escoar e, conseqüentemente, prolonga a camada solidificada ao longo de toda a parede

do molde (figura 20).

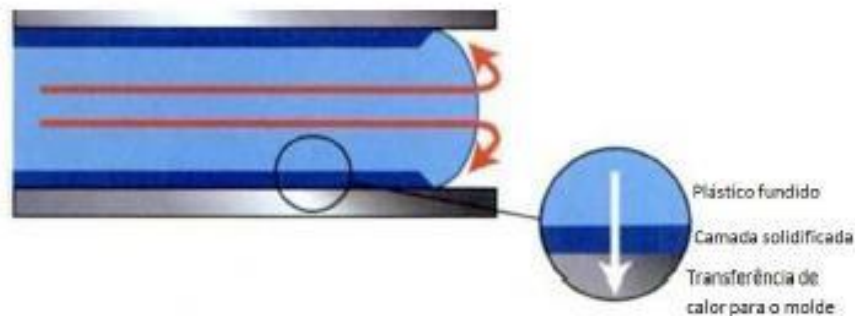


Figura 20 - Camada solidificada nas paredes do molde [17].

As setas vermelhas na figura 20 indicam a direção do fluxo de plástico fundido e através da seta branca, observa-se a direção do fluxo de calor do polímero fundido para as paredes do molde. Isto é, a montante, o fundido tem um fluxo constante transferindo mais material, o que faz gerar calor por fricção. Em simultâneo, perde-se calor com a camada solidificada à superfície da cavidade.

A camada solidificada é bastante fina e, por tal, o calor perde-se rapidamente fazendo com que o material continue a solidificar e aumentando a espessura da camada solidificada, diminuindo o fluxo de calor nas paredes da cavidade.

Durante o ciclo, a camada solidificada adquire uma dada espessura em que o calor perdido por condução é igual ao fluxo de entrada de calor do plástico fundido com a geração de calor por fricção. Assim, atinge-se uma condição de equilíbrio térmico [12].

Geralmente o equilíbrio térmico é atingido em décimos de segundo e como o tempo de enchimento é medido em segundos (isto é, uma ordem de grandeza superior), a camada solidificada chega ao ponto de equilíbrio logo no início da fase de enchimento [17].

3.5 TENSÃO DE CORTE DO FLUXO

No decorrer da fase de enchimento da cavidade, o fluxo de material é também submetido a uma tensão de corte designada por tensão de corte do fluxo. Esta tensão irá dirigir o material fazendo com que as moléculas fiquem alinhem na direção do fluxo.

No entanto, a taxa de corte, que é a taxa de material que desliza sobre a camada seguinte, varia de um mínimo no centro do escoamento e até um máximo junto à superfície da

camada solidificada (figura 21).

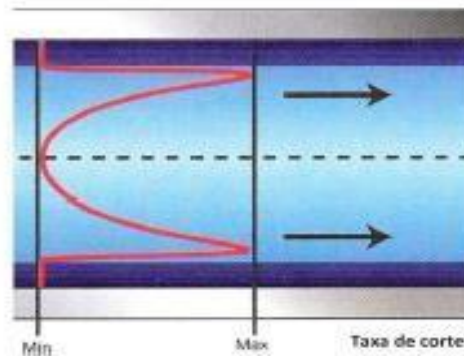


Figura 21 - Distribuição da taxa de corte [17]

O arrefecimento tem grande influência na orientação molecular do material polimérico. Quanto mais lentamente este se realizar, menor será a orientação das moléculas do polímero, uma vez que passa a dispor de mais tempo para estabilizar (figura 22).

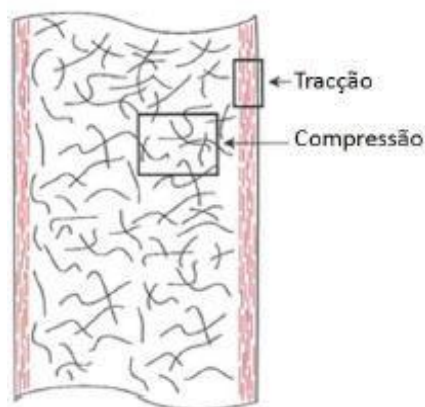


Figura 22 - Orientação molecular ao longo da espessura da peça [17].

Junto das paredes do molde verifica-se maior orientação devido ao rápido arrefecimento a que a camada foi sujeita. No centro, é visível uma redução da orientação molecular, visto que nessa zona o arrefecimento é mais lento e possibilita mais tempo de estabilização.

Tendo em conta os fatores da temperatura, transferência de calor e taxa de corte que afetam a viscosidade do polímero, a espessura também é um fator crucial. De acordo com a figura 23, a parte mais espessa da peça terá maiores dificuldades em conduzir o calor, já que os termoplásticos têm baixa condutividade térmica, a temperatura desta região será maior. Da mesma forma, a região mais fina da peça terá temperatura mais baixa e maior resistência ao fluxo [31, 32].

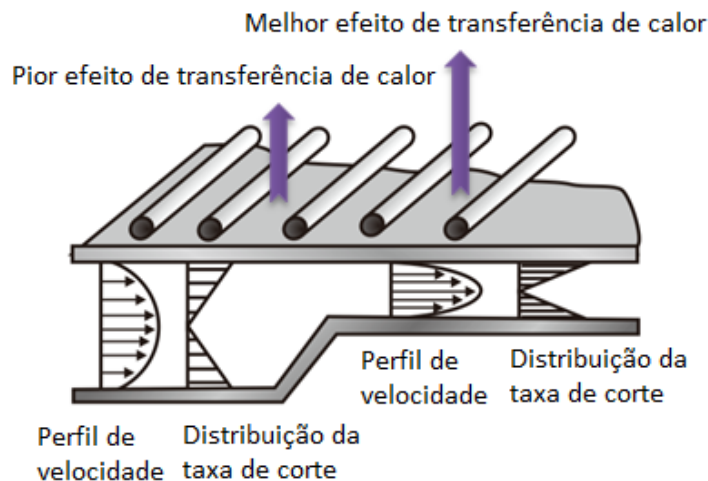


Figura 23 - Comportamento do fluxo e respetivas características segundo a variação da espessura [32].

A orientação molecular afeta o padrão de tensão residual próxima às paredes do molde desenvolvendo tensão de corte máxima e quando o material solidificar a camada fica impossibilitada de reajustar da orientação das moléculas. O material determinadamente orientado tende a contrair, sendo impedido de o fazer pelo restante na zona central. Assim, a camada próxima da superfície da peça fica sujeita a tração, enquanto o material da zona central fica sujeito a compressão (figura 23). De referir que as tensões residuais são uma das causas comuns do empeno das peças moldadas por injeção [17].

3.6 COMPRESSIBILIDADE DO FUNDIDO

Tendo em conta as características P-V-T do material, quando o polímero é aquecido, e sobre ele é aplicada uma determinada pressão, resulta uma elevada compressibilidade, que durante o processo de moldação por injeção é de elevada importância, uma vez que o volume de material que ocupa a cavidade do molde varia em função da pressão e da temperatura de operação. Devido a este comportamento, é evidente que qualquer variação nos parâmetros do processo, pode afetar positiva ou negativamente o produto final [31, 32].

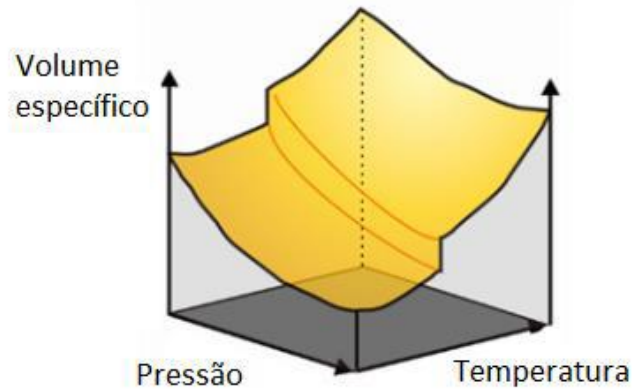


Figura 24 - Representação esquemática da dependência do volume específico em relação à pressão e temperatura [32].

3.7 SIMULAÇÕES CAE APLICADAS À INDÚSTRIA DOS MOLDES

Os softwares de CAE (Computer-aided engineering) ou, em português, de engenharia assistida por computador, funcionam através dos cálculos com as fórmulas específicas do software utilizando o método de elementos finitos ou FEM (finite elements method), este método numérico resolve problemas de engenharia e física matemática nas áreas de análise estrutural, transferência de calor, fluxo de fluidos, transporte de massa e potencial eletromagnético. A solução analítica destes problemas normalmente requer a solução para problemas de valor de limite a equações diferenciais parciais. A formulação do método finito do problema resulta num sistema de equações algébricas onde o método aproxima a função desconhecida sobre o domínio. Para solucionar um problema, o software de CAE subdivide um grande sistema em partes menores e mais simples que são chamados de elementos finitos. As equações simples que modelam os elementos finitos são construídas num sistema maior de equações que modela todo o problema. O FEM usa métodos variacionais do cálculo das variações para aproximar uma solução minimizando uma função de erro associada.

Ainda antes do desenvolvimento dos softwares CAE para simulação de enchimento de moldes, o processo de enchimento do molde era otimizado com base na técnica, sendo um processo desenvolvido por “tentativa erro”. Mesmo que os operadores de injeção tivessem conhecimento das características do processo dos materiais a fundir, o domínio sobre o seu comportamento dentro do molde era reduzido [31]. Muitos dos parâmetros de enchimento do molde, arrefecimento e projeto do molde influenciam na densidade da peça,

contração e qualidade superficial. Estes parâmetros eram muito determinados em função da experiência e não tanto da certeza. Como resultado havia inúmeras tentativas de injeção, muito desperdício de material e uma maior frequência na manutenção do molde.

Com recurso aos modelos teóricos sobre o comportamento do fluxo dos polímeros fundidos, desenvolvidos pelo Prof. Musa Kamal na Universidade de McGill em Montreal e com a análise do comportamento físico do fluxo feita nos AT&T Bell Laboratories por G. Williams e H. A. Lord, em 1978, o australiano Colin Austin desenvolveu o primeiro software de análise de enchimento, o qual simulava a pressão e comportamento do arrefecimento, dentro do molde, recorrendo as variáveis de controlo de dimensões do gate e dos canais de alimentação, fundando assim a Moldflow Corp. e colocando no mercado o primeiro software para simulação de injeção de moldes.

Inicialmente o software criava uma simulação layflat 2D do processo de enchimento do molde. Onde o utilizador era responsável por prever o padrão de enchimento, especificar a pressão de injeção e tempo total de enchimento. O computador dividia o tempo total de enchimento em partes iguais e disponibilizava uma tabela numérica com a queda de pressão, temperatura e tempo de enchimento para cada momento. Em 1982, a Moldflow Corp. desenvolveu um método a 2,5D, denominando-o de análise a meio-plano, permitia obter resultados mais fiáveis sobre o processo de enchimento e de arrefecimento. Este método baseava-se na representação CAD da peça e prévio padrão de enchimento, recorrendo a uma malha de elementos finitos da peça para calcular a temperatura, pressão, velocidade e tensão de corte para cada elemento, durante o enchimento.

Desde então, surgiram mais softwares CAE para simulação de injeção de polímeros, por exemplo o Sigmasoft, o Cadmould e o Moldex3D. E atualmente as capacidades destes softwares aumentaram imenso, incluindo agora uma maior precisão do enchimento com a simulação 3D peças sólidas e espessas (que no método de 2,5D não era possível), simulações da refrigeração por *conformal cooling*, contração da peça, empeno da peça, injeção assistida a gás, injeção com mucell, injeção bi-matéria, multi-cavidade, injeção-compressão e simulação de termoendurecíveis [32, 33].

Destacando agora no Moldex3D (da CoreTech System Co., Ltd), software utilizado neste projeto de dissertação, este foi desenvolvido em 1995 e agora é conhecido mundialmente na indústria de injeção de moldes permitindo aos seus utilizadores a resolução de problemas relacionados com o desenvolvimento do produto, otimizar o padrão de design, diminuir o tempo de projeto de molde e custos associados.

O Moldex3D é uma ferramenta muito útil na análise de enchimento do molde pois pode assegurar a qualidade com que as peças saem para o mercado, o cumprimento do prazo de entrega e o orçamento estimado. Tem grande destaque no desenvolvimento de desenho de peças 3D com geometria complicada e permite prever as características na qualidade de produzir peças já existentes, mais finas e mais leves. Mesmo que o software de simulação não garanta resultados 100% fiáveis, poderá evitar que grandes erros sejam cometidos. Assim, verificam-se várias das vantagens e desvantagens no uso deste *software* [34].

3.7.1 VANTAGENS

As vantagens são as seguintes:

-Permite experimentar/estudar condições de alto risco, num meio seguro e sem implicações perigosas, constituindo um modo útil para desenvolver as capacidades e aprender com o próprio erro na indústria dos moldes;

-Favorece aos utilizadores a capacidade de raciocínio, incluindo conhecimento no momento, procedimentos, capacidade de decisão e comunicação;

-Os projetos CAE podem ser repetidos várias vezes, alterando apenas um ou outro parâmetro e analisando as suas consequências por comparação, para uma melhor compreensão do comportamento do enchimento na cavidade [31].

3.7.2 DESVANTAGENS

As desvantagens são as seguintes:

- Num projeto CAE não é possível recriar na totalidade uma situação de vida real;
- Estes programas de simulação têm um alto custo de aquisição, requerem atualizações constantes e manutenção;
- Para obtenção de todas as situações de cálculo no enchimento de moldes, é necessário pagamento por cada uma delas (por exemplo o modulo do *cooling*, *warpage*, malha BLM, *conformal cooling*, *mucell*, etc.);

- É necessário ter uma boa formação a nível de CAD e CAE, mas também convém ter uma boa formação a nível de materiais poliméricos para que os resultados e o feedback sejam eficientes, o que requer tempo e dinheiro;

- A pessoa que desempenha a função de elaborar este tipo de projetos CAE tem de ter consciência, de que apesar de não existir uma consequência real pelos erros cometidos durante a simulação de enchimento deverá ter a capacidade de fazer com que venha a existir resultados mais fiáveis a irem de encontro à peça a ser injetada [31].

3.7.3 TIPOS DE MALHA

No Moldex3D é gerado praticamente todos os tipos de elementos de malha para um modelo sólido 3D, por exemplo, tetraedros, hexaedros, pirâmides e prismas, entre outros (figura 25). Maioritariamente, gerar elementos mais simples com a forma de tetraedros.

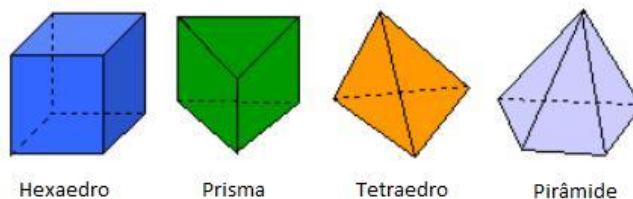


Figura 25 - Tipos de elementos para malha [35]

Porém, com a existência de geometrias mais complicadas nos casos reais, o uso de um só tipo de elementos de malha para definir a geometria real não é o mais conveniente, assim, o Moldex3D possui uma tecnologia que possibilita a aplicação de malhas híbridas na análise de modelos sólidos, reduzindo agilmente a quantidade de elementos e garantindo maior fiabilidade nos resultados.

A Boundary Layer Mesh (BLM) introduzida pelo software Moldex3D (figura 26) é uma malha híbrida que inclui dois tipos de elementos, elementos prismáticos de baixa espessura na superfície e elementos tetraédricos no interior. Neste tipo de malha é possível colocar desde zero até cinco camadas de elementos na vizinhança de cada superfície. Onde, se não for posta nenhuma camada de elementos obtém-se uma malha puramente tetraédrica, mas, determinando cinco camadas de elementos prismáticos na superfície são obtidas várias camadas ao longo da espessura da componente que consistem em cinco camadas de elementos prismáticos de reduzida espessura, como se fosse uma “carapaça”, seguidas

por várias camadas internas de elementos tetraédricos [35].

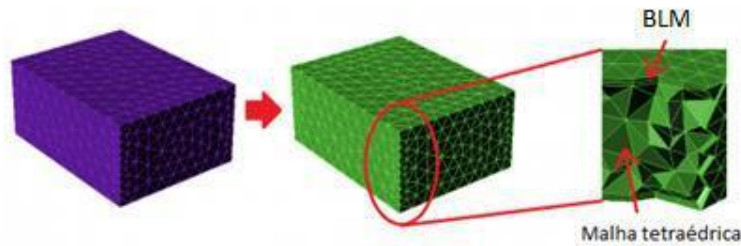


Figura 26 - Boundary Layer Mesh (BLM) [32]

Assim, obtém-se uma melhoria no preenchimento nas áreas junto à superfície e uma malha mais “tosca” no interior, reduzindo claramente o número de elementos. Onde, este tipo de malha (BLM) é mais consistente e simula com mais precisão a injeção do molde, obtendo maior fiabilidade nos resultados do projeto CAE [36].

3.8 PRINCÍPIOS E MODELOS DE ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS DO MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA

No Moldex3D, para captar a orientação das fibras durante o cálculo do fluxo de enchimento no molde, assume-se que o plástico fundido tem um fluxo puramente viscoso sem efeitos elásticos e que as suas características são generalizadas à de um fluido newtoniano com dependência das propriedades de tensão de corte, temperatura e pressão. Sendo que para o cálculo do enchimento no Moldex3D existem equações fundamentais para o fluxo do material, conservação da massa, momento e de energia usada com o volume de fluido.

A interpretação da orientação da fibra é dada quando uma única fibra está definida pelo vetor de orientação P e onde a função de probabilidade $\Psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi$ define a possibilidade de encontrar uma fibra entre (θ, ϕ) e $(\theta+d\theta, \phi+d\phi)$ com a função de distribuição de probabilidades a satisfazer duas condições físicas, sendo que, uma extremidade da fibra é indistinguível da outra, levando à necessidade de normalizar a função para $\Psi(\theta, \phi) = \Psi(\pi - \theta, \phi + \pi)$. Como cada fibra deve ter uma direção definida, então o requisito de normalização à função é o integral duplo da probabilidade de $\Psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi = 1.0$ (figura 27):

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \Psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi = 1.0 \quad (6)$$

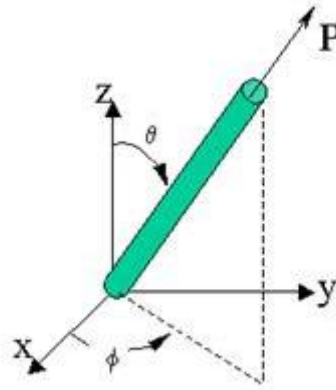


Figura 27 - Deslocação da fibra segundo o vetor P [32].

Na expressão da função de probabilidade $\Psi(\theta, \phi)$, o tensor de orientação de fibra de segunda ordem A_{ij} é definido pela expressão:

$$A_{ij} \equiv \langle p_i p_j \rangle = \int p_i p_j \psi(p) dp \quad (7)$$

Então, sabendo que A_{ij} é um tensor simétrico com $A_{ij}=A_{ji}$, temos em consideração que $A_{11}+A_{22}+A_{33}=1$. O tensor de orientação é real e simétrico, tem três eigenvectores ortogonais e_1, e_2, e_3 e três valores eigen I_1, I_2, I_3 . Cada eigenvalue varia entre 0 e 1. No pós-processamento da orientação da fibra, o maior eigenvalue e o seu eigenvector correspondente são traçados em conjunto para mostrar os complexos fenômenos de orientação da fibra. A orientação do vetor mostra a direção de orientação mais favorável, enquanto a magnitude do mesmo (exibida a cores) mostra o grau de orientação. Em suma, numa orientação aleatória, o valor máximo seria de 1/3 para uma orientação totalmente alinhada, seria um valor máximo de aproximadamente 1 [32].

3.8.1 MODELO TRADICIONAL DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

Nos Parâmetros de Cálculo é permitido ao utilizador do moldex3D alterar os tipos de enchimento entre fibras curtas e longas. Além disso, existem três abordagens com excelente precisão de orientação da fibra para compósitos de fibras curtas ou longas: modelo hidrodinâmico de Jeffery que considera o movimento de uma partícula rígida num fluxo viscoso numa equação inicial de análise clássica para descrever o comportamento da partícula no fluxo; Difusão rotativa; Interação Fibra-Matriz.

Na opções de orientação das fibras no compósito, o moldex3D segue a abordagem da difusão rotativa em três métodos. O primeiro método de Folgar-Tucker (modelo original de

cálculo para a orientação de fibras Moldex3D) que integra o modelo hidrodinâmico de Jeffery com o modelo de Folgar-Tucker IRD (Difusão Rotativa Isotrópica) formando um modelo matemático denominado por equação de orientação normalizada de Folgar-Tucker (FT). O segundo método de ARD (Modelo de Difusão Rotativa Anisotrópica) onde o tensor IRD no modelo FT descreve a interação fibra-fibra para fibra curta e o tensor ARD é introduzido nas coordenadas cartesianas 3D e invocado juntamente com o modelo Hidrodinâmico (HD) de Jeffery. E o terceiro método de iARD (Modelo de Difusão Rotativa Anisotrópica Melhorado) o tensor ARD melhorado (iARD) calcula naquele espaço o tensor espacial com dois parâmetros físicos relativos às fibras usadas e ao espaço, em vez de usar vários coeficientes correlacionais. A tabela 5 descreve de forma sucinta, o que acontece em cada um dos métodos referidos.

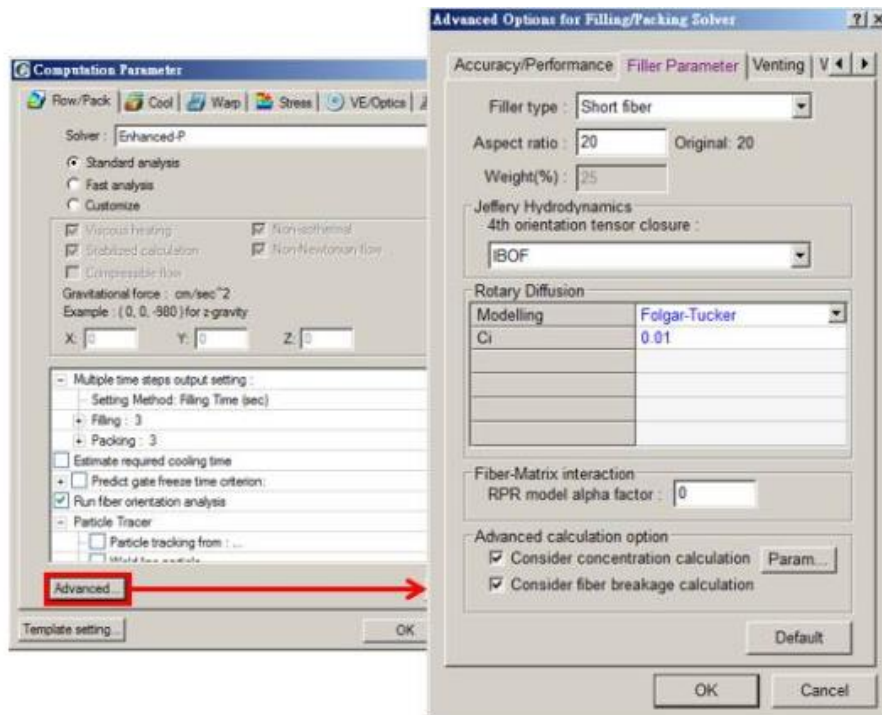


Figura 28 - Seleção das opções de orientação das fibras [32]

Tabela 5 - Diferenças existentes nos métodos de orientação da fibra na anisotropia do material

| | |
|---------------|--|
| Folgar-Tucker | Contabiliza as interações de fibra com fibra dentro da difusão rotativa isotrópica ajudando a captar o perfil de distribuição e de orientação das fibras curtas. |
| ARD | Contabiliza as interações de fibra com fibra na difusão rotativa anisotrópica dando a entender o perfil de distribuição e de orientação das fibras longas com desvantagem de existir cinco parâmetros a definir para o cálculo. |
| iARD | Contabiliza as interações de fibra com fibra na difusão rotativa anisotrópica com melhor previsão e entendimento do perfil de distribuição e de orientação das fibras longas, sendo necessário a introdução de dois parâmetros para o cálculo. |

Num modo geral este método chamado modelo tradicional descreve a matriz do polímero com fibras, em que, a matriz e as fibras são dois constituintes conectados do composto, ambos carregam cargas e a ligação entre a fibra e a matriz afeta fortemente na partilha de carga e na deformação do material. Embora o modelo iARD não seja objetivo, foi demonstrado fornecer uma razoável orientação das fibra anisotropicamente. Infelizmente, o modelo iARD pode dar respostas diferentes em sistemas de coordenadas diferentes. Tal modelo também não é facilmente alterado. Apesar da insuficiência do modelo, o iARD-RPR tem produzido resultados satisfatórios quando utilizado para lidar com muitos problemas práticos de domínios geométricos complexos [32, 37].

3.8.2 MODELO DE HALPIN-TSAI

O método Halpin-Tsai é uma técnica matemática utilizada no cálculo da rigidez de compósitos reforçados por micro e nano partículas, onde os módulos de Young longitudinais e transversais dos compósitos são calculados. Em seguida, o módulo elástico de compósitos orientados aleatoriamente é obtido usando uma equação que contém um coeficiente, considerado constante e independente da matriz e propriedades de reforço [38].

No modelo para compósitos de Halpin-Tsai no moldex3D, o compósito polimérico é constituído por fibras descontínuas e onde é pressuposto no seu modelo matemático que

as fibras estão perfeitamente alinhadas, a distância é igual entre fibras, o diâmetro e comprimento das fibras são constantes e existe a adesão perfeita entre fibras e matriz [32].

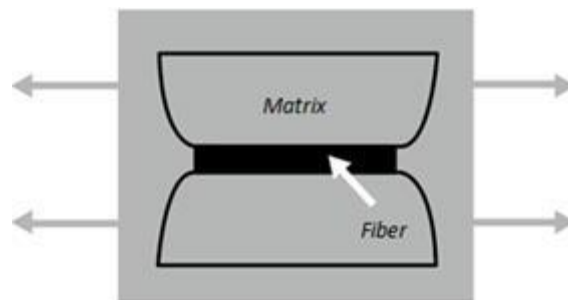


Figura 29 - Esquema das fibras e matriz de polímeros no modelo para compósitos de Halpin-Tsai [32].

O modelo de Halpin-Tsai não é só aplicado na determinação dos módulos de Young de compósitos reforçados por fibras. Dentro de muitos casos de estudo e artigos científicos, encontra-se com ótimos resultados, o método também aplicado em micro e nano-reforços de SiO_2 , Al_2O_3 e CaCO_3 (com matrizes poliméricas de PEEK, PP e PS e ainda Epoxy/ Al_2O_3), onde estas nanopartículas esféricas assumem propriedades de interfase (fração volúmica, espessura e módulo) e tamanho do nano-reforço. O modelo desenvolvido previu com precisão o módulo Young de partículas nos nanocompósitos poliméricos. É revelou que, ignorando a interfase ou usando valores inadequados para propriedades interfases, leva a uma estimativa inadequada do módulo de Young em nanocompósitos [39].

3.8.3 MODELO DE MORI-TANAKA

O modelo Mori-Tanaka tem sido utilizado no moldex3D para prever com precisão propriedades mecânicas de compósitos, especialmente ao nível da escala dos micrómetros ou superior tal como o modelo anterior de Halpin-Tsai. No modelo Mori-Tanaka, presume-se que a matriz e a fibra estão perfeitamente ligadas umas às outras, e a fibra é assumida como distribuída uniformemente [32].

Para compósitos de polímeros reforçados com fibras, a anisotropia local ocorre devido à alta proporção de inclusões, que podem influenciar o desempenho mecânico ou termomecânico dos produtos finais, como estabilidade dimensional, fluibilidade, dureza, e força. Por isso, é importante investigar a inter-relação entre a anisotropia local e as propriedades mecânicas dos compósitos. Recentemente, o método de digitalização Micro-

CT mostrou-se eficaz para investigar a estrutura interna dos compósitos. A abordagem *mean-field* de Mori-Tanaka foi utilizada no modelo de micromecânica com as distribuições de comprimento de fibra obtidas experimentalmente para apresentar a anisotropia local e o módulo elástico eficaz dos compósitos na orientação das fibras nos casos unidirecional e aleatório. Confirmando que as distribuições do comprimento de fibras das fibras de vidro afetam no módulo elástico, bem como a anisotropia local dos compósitos, sendo que a análise anisotrópica local foi uma boa medida para entender a tensão mecânica dos compostos. [40]

4 METODOLOGIA IMPLEMENTADA

Neste projeto de dissertação foram efetuadas medições do molde em estudo, já existente nos laboratórios de Engenharia mecânica da ESTG, foi usado o software de CAD Solidworks para modelação 3D e conforme a aproximação feita, o fator de contração usado foi de 1,8% que está mais ou menos conforme com o que é usado para um projeto de um molde para uma peça plástica de polipropileno, poliestireno ou policarbonato.

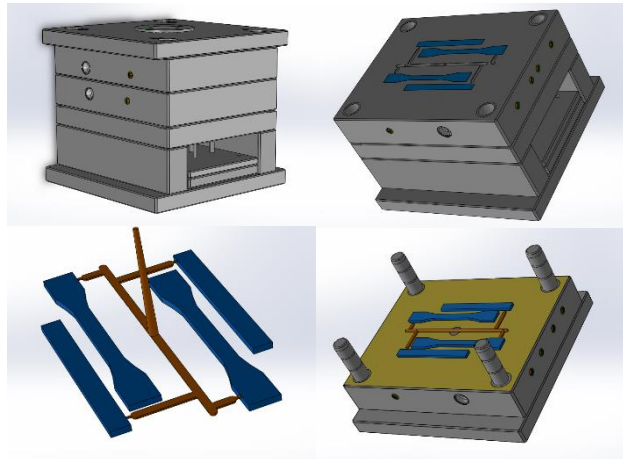


Figura 30 - Perspetivas do projeto do molde elaborado em Solidworks

O molde utilizado para este projeto de dissertação, foi projetado para obter provetes de tração e flexão de polímeros em geral (PP, PE, PET, etc.), atendendo à antiguidade do molde em questão, toda uma serie de questões físicas relacionadas à mecânica do molde e o material em estudo ser um compósito de matriz polimérica, formado por PP e 20% de fibra de vidro (anexo A), não adequado à plasticização do molde em questão. Foram obtidos uma serie de provetes de tração e de flexão de acordo com os parâmetros inseridos no software de calculo numérico moldex3D e transpostos para a máquina de injeção.



Figura 31 - Molde para os ensaios de injeção

Na figura 32, temos o enchimento dos provetes obtido no moldex3D através de parâmetros considerados normais ao enchimento do volume da peça plástica e o que foi obtido fisicamente com o molde em questão da figura anterior. Com algumas adversidades durante os ensaios de injeção, onde durante algum tempo (com os parâmetros utilizados em moldex3D iguais aos da máquina de injeção) foram extraídos do molde provetes (figura 32). Tendo em conta que nas primeiras horas do processo de injeção, os provetes de flexão não enchiam por completo, foram aproveitados os provetes de tração para ensaios e, a meio das moldações a “velhice” deste molde e/ou efeitos da própria máquina de injeção fez com que só se obtivesse provetes de flexão e os de tração não enchiam por completo.

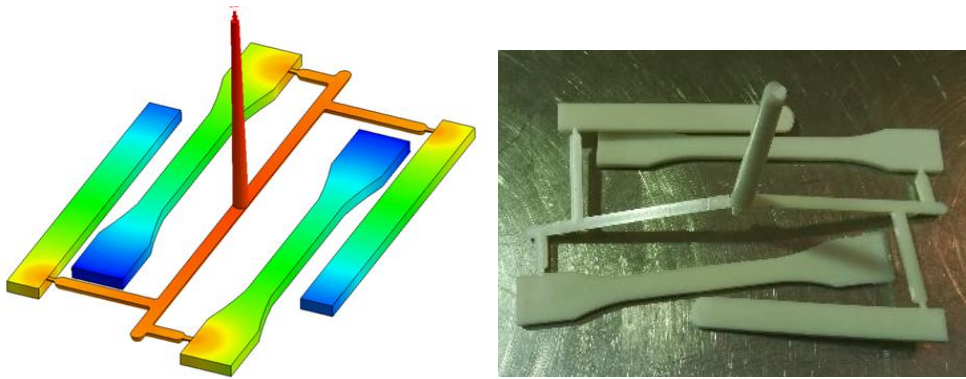


Figura 32 – a) Diferença entre moldação por CAE e b) moldações reais obtidas

Para conseguir chegar a conclusões com ensaios mecânicos de tração e flexão, DMA, DSC, dureza shore e medição de densidade dos provetes, teve de se retirar todas as “rebarbas” existentes nas zonas de junta dos provetes devido à má vedação do molde entre a bucha e cavidade durante a plasticização.

4.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Na elaboração de um projeto de simulação reológica com o software Moldex3D é preciso possuir as seguintes informações:

- Ficheiros do projeto de molde, com o fator de contração aplicado nos artigos a moldar;
- Toda a informação sobre os bicos de injeção (marca, diâmetro do *gate*, diâmetros dos canais do sistema de injeção, sistema de injeção valvulado ou não, etc.) e/ou ataque (injeção direta, submarina, leque, “unha de gato” ou submarina curva, etc.) à peça a usar no estudo;
- Informação sobre a máquina de injeção a ser usada para as moldações ou capacidade de força de fecho;
- O *data sheet* com informações das características mecânicas e físicas do material a ser utilizado para a plasticização;
- Com o *data sheet* do material e tendo em consideração o volume da peça plástica consulta-se nas tabelas a velocidade do fundido e a pressão de injeção a aplicar.

4.1.1 PROCEDIMENTO PARA O ESTUDO REOLÓGICO COM O MOLDEX3D

Abrir a vertente Designer Moldex3D no atalho do ambiente de trabalho do computador, selecionar o modo de criação da malha (figura 33), que neste projeto foram usados os dois modos para comparação de resultados da malha e do processo CAE de enchimento.

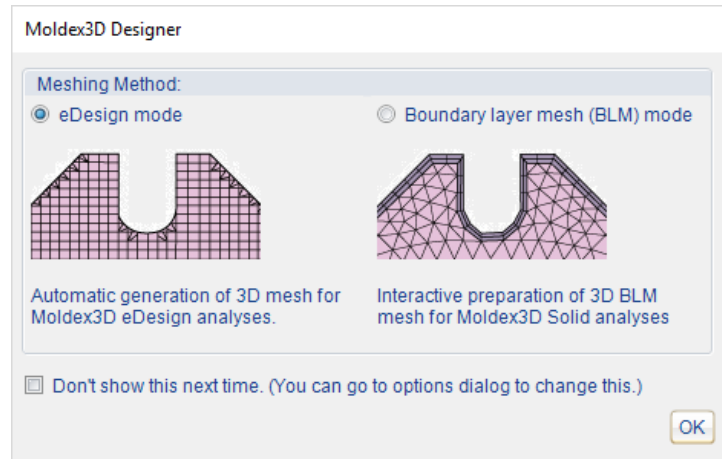


Figura 33 - Seleção do modo de cálculo da malha no Moldex3D [36]

No Designer Moldex3D, do lado esquerdo encontram-se indicados os passos ordenados para a criação de um modelo de simulação (figura 34):

- 1 – Importar e corrigir artigo;
- 2 – Criar sistema de alimentação;
- 3 – Criar sistema de refrigeração;
- 4 – Gerar Malha;
- 5 – Exportar a malha.

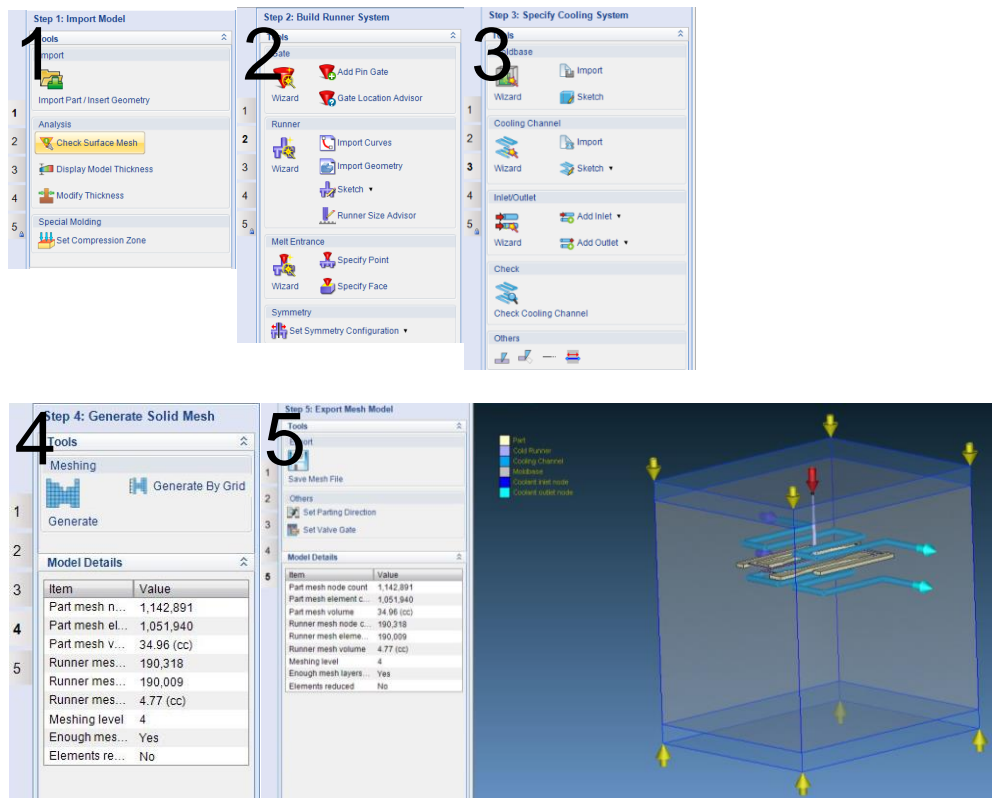


Figura 34 - Passos para elaboração da malha

De notar que o *software* ao gerar a malha de cálculo indica o número de nós, de elementos e volume de plástico a injetar contidos na malha. Na criação de malha BLM os passos 4 e 5 já diferem um pouco, e observa-se notoriamente a diferença entre malhas geradas e com melhor capacidade de cálculo FEM, a contagem de nós e elementos é menor que a malha dita normal (figura 35).

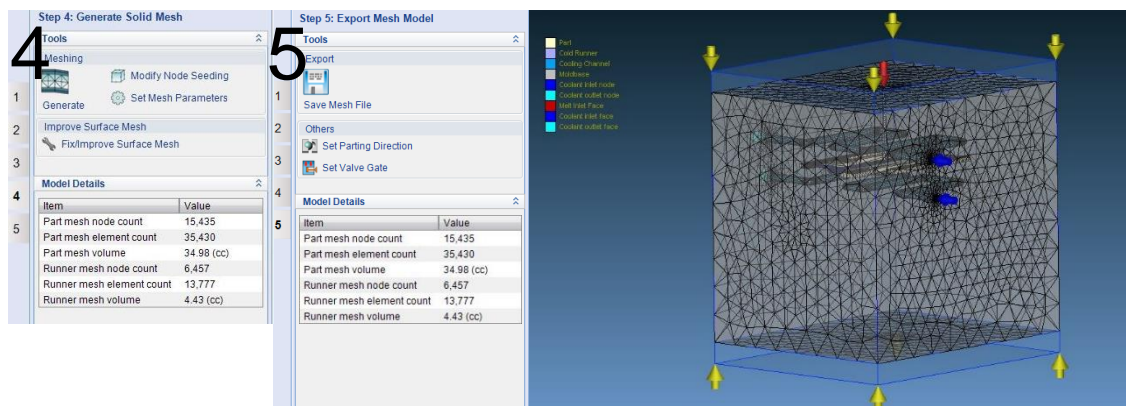


Figura 35 - Passos para elaboração da malha BLM

4.1.2 CONFIGURAÇÃO DE DADOS NO MOLDEX3D

Com os dados inseridos na máquina de injeção, conforme a figura 36, foi efetuado o processamento do compósito de matriz polimérica em estudo. Neste processo foram admitidos parâmetros de acordo com o anexo A e seguindo todas as diretivas de acordo com o funcionamento da máquina de injeção e diretivas técnico-laboratoriais impostas nos laboratórios de Eng^a Mecânica da ESTG.

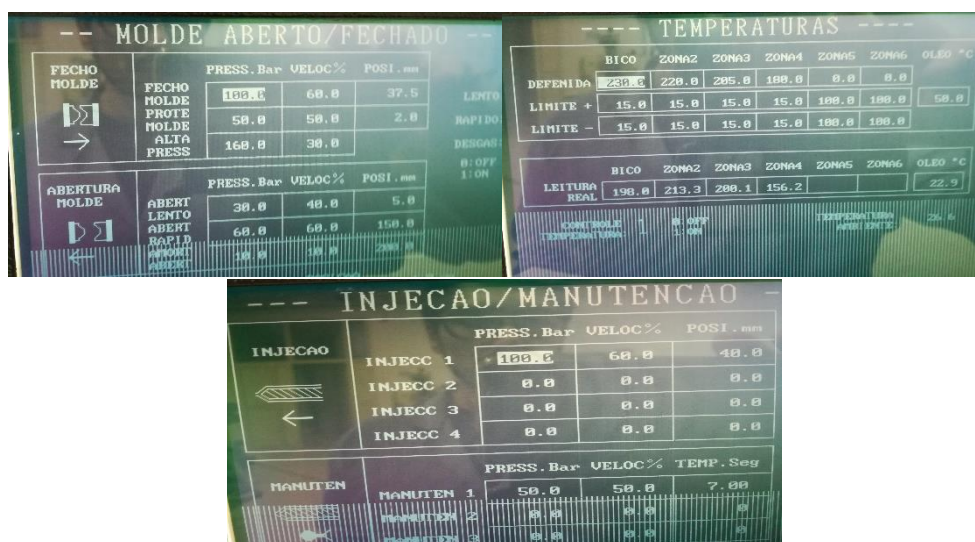


Figura 36 - Parâmetros inseridos na máquina de injeção

De acordo com a figura 36, procedeu-se à inserção destes parâmetros no Moldex3D, dando início ao cálculo numérico CAE. Na figura 37, destaca-se a verificação dos dados inseridos. Estes parâmetros foram utilizados com malha normal e malha BLM. Desenvolvendo-se três estudos por malha e onde cada um desses estudos CAE seguia um método de orientação das fibras segundo as opções existentes no *software*.

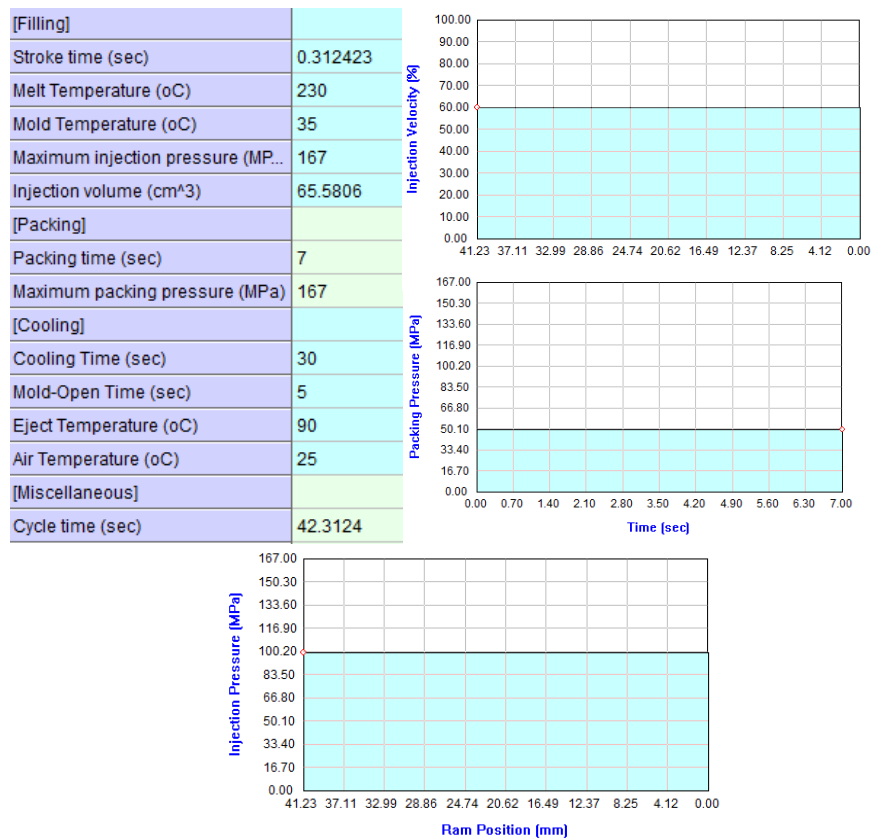


Figura 37 - Dados verificados após inserção dos parâmetros de injeção no moldex3D

4.2 TRABALHO EXPERIMENTAL

De seguida será descrito o trabalho experimental que foi executado para caracterizar os provetes que foram injetados por forma a comparar com o trabalho numérico descrito anteriormente.

4.2.1 ENSAIO DMA

A análise mecânica dinâmica funciona através da aplicação de uma tensão oscilatória numa amostra com geometria pré-determinada de dez de largura, quarenta e cinco de comprimento e um a quatro milímetros de espessura. A amostra é sujeita a uma tensão controlada e irá deformar até um certo ponto, tendo em conta que a deformação depende da rigidez do material.

A tensão é gerada através de um motor e transmitida à amostra através de um veio de transmissão.

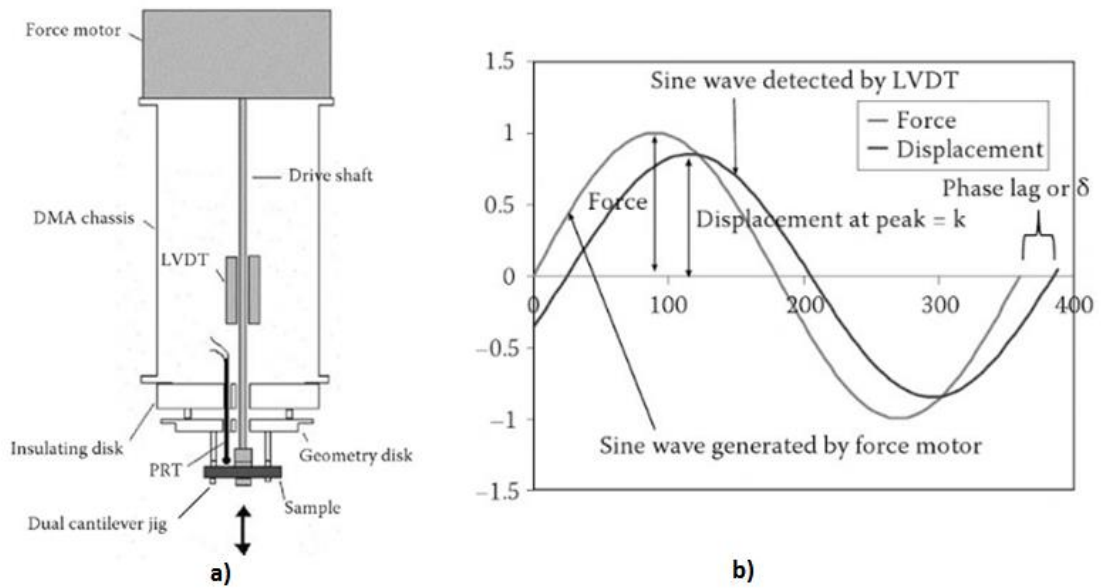


Figura 38 - Constituição da máquina DMA (a) e Ondas sinusoidais aplicadas (b) [41].

Como os materiais poliméricos apresentarem um comportamento viscoelástico é conveniente separar o comportamento em duas componentes; uma pseudo-elástica em fase, governada pelo módulo de armazenamento (E') e, outra componente fora de fase pseudo-viscosa governada pelo módulo de perda (E'').

O módulo de armazenamento pode ser definido por:

$$E' = \frac{\text{Amplitude de Tensão em fase}}{\text{Amplitude da deformação}} \quad (8)$$

Já o módulo de perda pode ser definido pela seguinte equação:

$$E'' = \frac{\text{Amplitude da Tensão fora de fase}}{\text{Amplitude da deformação}} \quad (9)$$

A partir da tangente do ângulo de fase (desfasamento entre a tensão e a deformação) define-se o fator de perda ou *damping* ($\tan \delta$):

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (10)$$

Fisicamente representa a razão entre a energia dissipada e a energia armazenada por ciclo de deformação.

O ensaio de análise mecânica dinâmica pode distinguir-se em duas vertentes, a análise pode ser feita em modo de oscilação forçada ou em modo de oscilação livre (figura 39). O que as distingue é o modo como é feita a oscilação, na oscilação forçada uma determinada amplitude (constante durante todo o ensaio) é aplicada ao material, variando-se a temperatura ou a frequência, enquanto que na oscilação livre a amostra é submetida a uma deformação na sua frequência natural de ressonância e regista-se o declínio da amplitude em função do tempo [41].

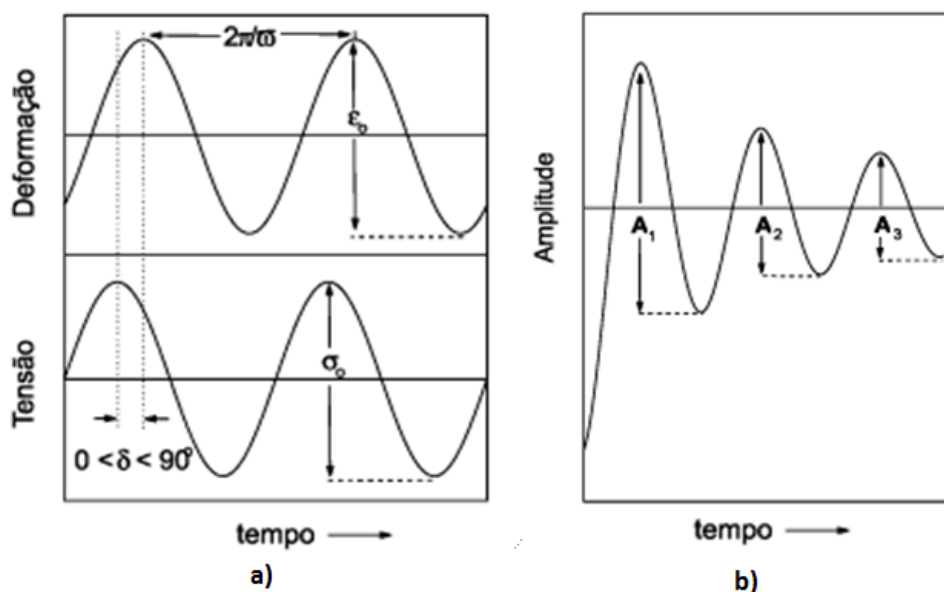


Figura 39 - Oscilação Forçada (a) e Oscilação Livre (b) [41].

A figura 40 representa as principais características observadas durante um varrimento de Análise Mecânica Dinâmica (DMA) para um polímero semi-cristalino. Relaxações poderão ocorrer nas regiões cristalinas (c) tal como nas regiões amorfas (a).

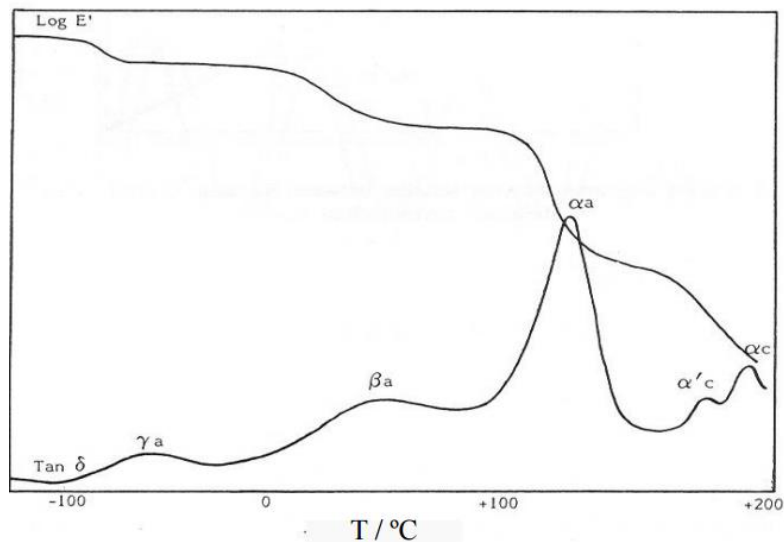


Figura 40 - Comportamento de E' e $\tan \delta$ típico para um polímero semi-cristalino, a e c referem-se à fase amorfa e cristalina [41].

As relaxações observadas na fase amorfa, tal como, as relaxações na fase cristalina, são etiquetadas com letras do alfabeto grego (α_a , β_a , γ_a , δ_a , etc...), com a diminuição da temperatura. Este procedimento garante que o processo de temperatura de transição vítrea (T_g) é sempre α_a e, as relaxações subsequentes no estado vítreo são β_a , γ_a , etc... Às relaxações acima da temperatura de transição vítrea (T_g), na fase cristalina normalmente dão-se os símbolos α_c , α'_c , etc., à medida que a temperatura decresce.

Uma das vantagens desta técnica é que se consegue obter os módulos a cada momento em que um sinal sinusoidal é aplicado, permitindo obter um valor de módulo a cada segundo [11].

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D-7028, e foi administrado em cada uma de três amostras do compósito de polipropileno com vinte por cento de fibra de vidro selecionadas para este efeito (figura 41). Primeiramente esta foi colocada no suporte do equipamento (figura 41) e foi então definida uma temperatura máxima de 180°C que o material poderia atingir sem chegar à temperatura do ponto de fusão.

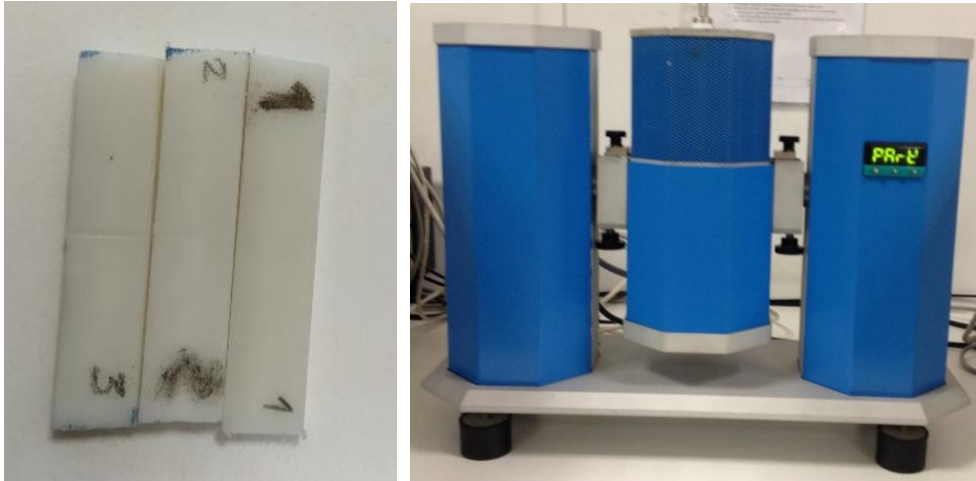


Figura 41 - Amostras dos provetes cortadas para a geometria pretendida ao ensaio DMA (a) e respetivo equipamento do ensaio Tritec 2000 DMA da Triton Technology (b)

4.2.2 ENSAIO DSC

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) é uma variante da técnica de DTA, na qual se mede diretamente a quantidade de energia calorífica (fluxo de calor) trocada entre a amostra e o meio ambiente em comparação com um material de referência e associado a transições nos materiais em função da variação de temperatura. Para além de ser uma técnica mais sensível e de maior precisão, o DSC permite a determinação de parâmetros que não são possíveis de obter através de DTA.

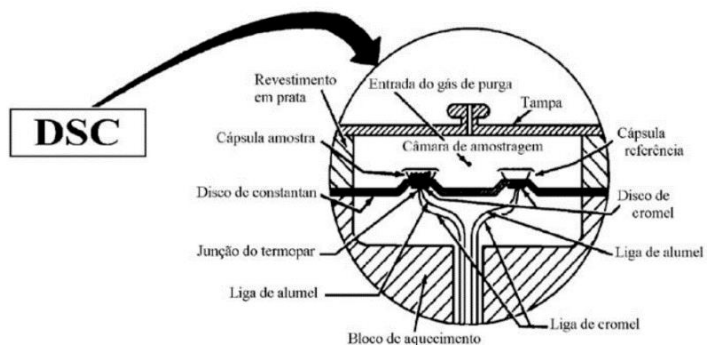


Figura 42 - (a) Componentes em análise na Máquina DSC, (b) Representação esquemática da secção transversal de um equipamento de DSC da DuPont (dupont) [42].

O DSC regista o fluxo de energia calorífica associado a transições nos materiais em função da temperatura. É um método que varia a entalpia, no qual a diferença no fornecimento de energia calorífica entre uma substância e um material de referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância em estudo e a referência são submetidas a um

mesmo programa de aquecimento, ou arrefecimento, rigorosamente controlado. Estas medidas fornecem dados qualitativos e quantitativos em processos endotérmicos (absorção de energia calorífica) e exotérmicos (libertação de energia calorífica), permitindo obter informações referentes a alterações de propriedades físicas e/ou químicas como, por exemplo [42, 43]:

- Temperaturas características:
 - Temperatura de fusão;
 - Cristalização;
 - Transição vítrea (esta nem sempre é possível de ser determinada);
- Grau de cristalinidade de um polímero;
- Diagramas de fase;
- Entalpias de transição de fase e de reação;
- Estabilidade térmica e oxidativa;
- Grau de pureza;
- Cinética de reações.



Figura 43 - Amostra a aplicar no ensaio (a) e máquina de ensaio DSC 131 da SETARAM Instrumentation (b)

Nas análises calorimétricas de varrimento executadas no Laboratório obtivemos a curva que representa o fluxo de energia em função da temperatura. Nesta curva, observamos a existência de duas fases distintas do ensaio, principalmente o aquecimento e o arrefecimento.

4.2.3 DUREZA SHORE EM ESCALA D

Sob a norma internacional ISO 868-1985 (F) a dureza shore tipo D aplica-se a Borrachas duras e plásticos tipo termoplásticos, plataformas e pistas de bowling. É feita através do impacto de um cone de penetração com ângulo de 30° a exercer uma força de 445 mN no material em estudo.

A escala de dureza varia entre 0 (quando o penetrador de 2,5 mm se sobressai completamente) a 100 (quando não sobressai). A carga é aplicada o mais rapidamente possível, sem bater, e o valor da dureza é lido após cerca de 15seg +/- 1seg. se for especificada uma leitura instantânea a escala lida após 1 segundo da aplicação de carga. Não existe qualquer relação entre os resultados obtidos com um tipo e outro de durometro, ou qualquer outro instrumento utilizado para medir a dureza.



Figura 44 - Medidor de dureza shore do laboratórios de Eng^a Mecânica da ESTG

4.2.4 ENSAIO DE DENSIDADE PELA NORMA ASTM D792-00

O cálculo da densidade relativa de substâncias envolve a determinação do quociente entre a massa de um determinado volume de material e a massa de um igual volume, por exemplo, de água desionizada, a temperatura constante.

Para determinar a densidade da amostra utilizou-se água desionizada a uma temperatura de 20°C cuja densidade é 0.9982g/ml.

Pela norma ASTM D792-00 foi realizada a pesagem do gobelé preenchido com água desionizada, simultaneamente com a amostra seca junto deste. De seguida, foi colocada a amostra dentro do gobelé, e, depois de ajustado o nível de água pela marcação (figura 45).

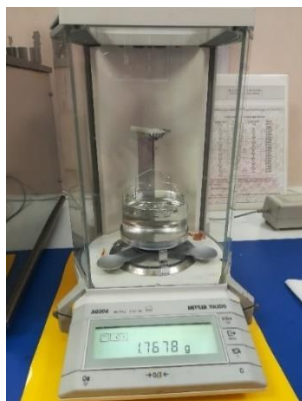


Figura 45 - Pesagem da amostra inserida no gobelé

A densidade do material é determinada por:

$$\rho_{amostra} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_{H2O} \quad (11)$$

Foram então extraídas três amostras dos provetes, outrora obtidos por meio do processo de injeção de termoplástico, de tamanho similar e com polimento das suas superfícies efetuado (figura 46).



Figura 46 - Amostras obtidas dos provetes de PPGF20%

4.2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO SEGUNDO A NORMA ASTM D638-14

O ensaio de tração consiste em solicitar uma amostra de material a cargas unidirecionais crescentes até à rotura. Este ensaio é, normalmente, realizado em máquinas eletromecânicas, ou mesmo em máquinas hidráulicas, com diferentes capacidades de carga. A partir dos dados relativos aos valores de carga e de deslocamento obtidos a partir do software da máquina e das equações da resistência de materiais, para uma dada velocidade de aplicação de carga e para a temperatura de ensaio, pode-se determinar as curvas de variação da tensão versus extensão, os valores de tensão máxima e os valores de módulo de elasticidade em tração. Este tipo de ensaios permite avaliar o comportamento do material e, conseqüentemente, quando selecionado para uma dada aplicação ser dimensionado por forma a não serem ultrapassados os seus limites de resistência mecânica.

Na determinação dos valores de tensão é utilizada a equação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

No cálculo da extensão usou-se a seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (13)$$

Na determinação dos valores do módulo de Young é utilizada a equação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (14)$$

O ensaio de tração foi realizado na máquina universal eletromecânica de ensaios Z100 da Zwick (figura 47) e, de acordo com a norma ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Os ensaios foram realizados com velocidades de 10 mm/min e à temperatura ambiente (American Society for Testing and Materials, 2010).



Figura 47 - Máquina de ensaios mecânicos Zwick Z100

4.2.6 ENSAIO DE FLEXÃO

Foram efetuados ensaios de flexão em cinco provetes segundo a norma ASTM D790 (com igual recurso à máquina universal eletromecânica de ensaios Z100 da Zwick) (figura 48), onde diz que é utilizada uma célula de carga de 10kN para os ensaios de flexão em materiais termoplásticos ou compósitos de matriz termoplástica.



Figura 48 - Ensaio de Flexão em provetes de flexão

Infelizmente a célula de carga de 10kN não estava disponível no laboratório, tendo sido usada uma célula de carga de 100kN, que é uma célula de carga aplicada em ensaios de flexão, segundo a norma ASTM, de materiais metálicos e cerâmicos. Neste ensaio, devido à célula de carga usada, os resultados obtidos foram inadequados e inconclusivos, obtendo assim um gráfico (figura 49) onde apenas é possível observar uma aproximação a uma curva típica de flexão de um polímero termoplástico.

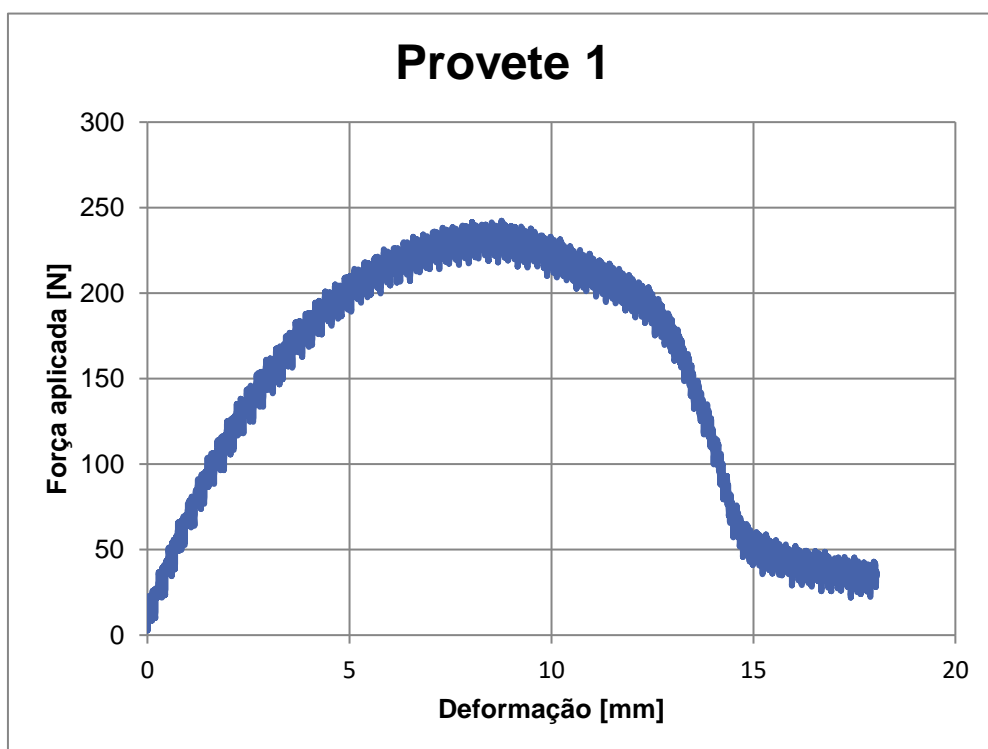


Figura 49 - Gráfico obtido em ensaio de flexão

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 SIMULAÇÕES REOLÓGICAS DE POLÍMEROS COM FIBRAS

Na simulação reológica CAE consegue-se obter os principais resultados a ter em consideração num processo de moldação por injeção, neste projeto de dissertação foi possível através das simulações numéricas, ficheiros de visualização e relatórios obtidos nas simulações numéricas com o Moldex3D. Onde, gerando uma malha dita normal a 2.5D e aplicando os parâmetros considerados para as simulações numéricas, o fluxo dá um tempo de enchimento do molde de 0.44 segundos, uma pressão de injeção na cavidade do molde de 93,6MPa, atinge uma temperatura máxima do fundido de 247,62°C durante o enchimento da cavidade e a orientação das fibras está maioritariamente direcionada segundo o sentido do comprimento dos provetes. A computação desta malha demorou em media cerca de cinco horas, num dos computadores do laboratório Siemens da ESTG, por simulação numérica.

Na simulação numérica com a geração de malha do tipo BLM, é utilizado um menor número de nós e elementos de malha para o cálculo do que na malha dita normal, sendo que com recurso a esta malha o software gerou resultados muito mais rapidamente e mais fiáveis por serem elementos finitos expostos camada a camada. Foi cerca de cinco minutos de computação, por simulação, até obtermos os resultados com este tipo de malha no mesmo computador.

Comparando os resultados dos estudos elaborados no Moldex3D na malha BLM, o fluxo dá um tempo de enchimento do molde de 0.36 segundos, uma pressão de injeção na cavidade do molde de 95,72MPa, atinge uma temperatura máxima do fundido de 244,18°C durante o enchimento da cavidade e a orientação das fibras está também maioritariamente direcionada segundo o sentido do comprimento dos provetes.

Aplicando as três metodologias disponíveis de orientação das fibras do Moldex3D, já referidas anteriormente no capítulo 3, os resultados em ambas as malhas de simulação numérica são em todos os parâmetros iguais. À exceção, de quando se chega à verificação dos resultados do capítulo do *Warpage*, aí os valores ao longo desse capítulo variam um pouco entre a metodologia *Traditional model composite*, com a de Halpin-Tsai e a de Mori-Tanaka.

5.2 RESULTADOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL

5.2.1 DMA

Na aplicação de uma solitação mecânica à flexão em 3 pontos para cada uma das amostras referenciadas no capítulo anterior, foram eleitos os resultados da amostra número três para discussão do ensaio DMA. Para uma temperatura de 180°C a uma velocidade de 5°C/min., com os respectivos valores das propriedades dinâmicas foi possível obter a representação gráfica das características do material (figura 50). Ao analisar a representação gráfica obtida, observam-se dois tipos de curvas. A vermelha está representado o fator de perda (Tan δ) e a azul o módulo de armazenamento E'.

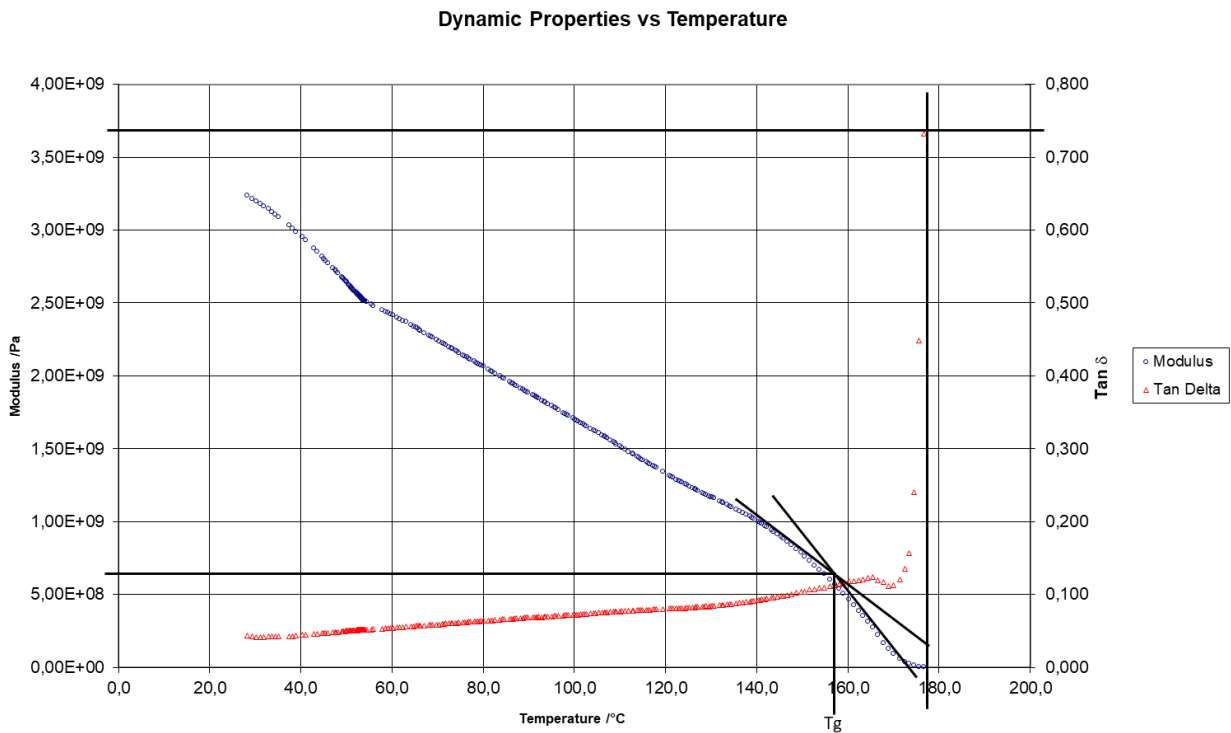


Figura 50 - Análise da representação gráfica do ensaio

Verifica-se assim, os valores da temperatura de transição vítrea (T_g) de aproximadamente 157°C representado na curva azul e com correspondência a um módulo de elasticidade de aproximadamente 6,50E+08 Pa.

Quanto à curva descrita pela cor vermelha, que corresponde ao fator de perda, observa-se que aproximadamente a uma temperatura de 177,5°C temos o pico do desfaseamento, onde determina a que temperatura o material perde a sua rigidez, com o valor de Tan δ de aproximadamente 0,74.

5.2.2 DSC

Ensaio 1 – grânulo de matéria prima PPGF20%

Peso da amostra – 44,4mg

Varrimento dos 20°C aos 260°C

Velocidade – 5°C/min.

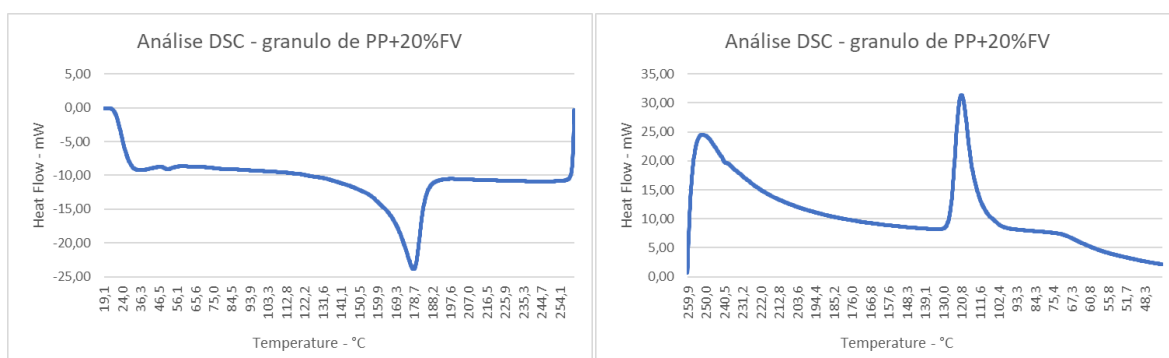


Figura 51 - Gráficos das curvas de aquecimento e arrefecimento da amostra grânulo de matéria prima PPGF20%

Na figura 51, entre os 155° e os 188° na fase de aquecimento, observamos um pico na absorção de energia pelo material, este pico diz respeito a um pico endotérmico e é correspondente ao ponto de fusão do material, onde a temperatura de fusão é de 178,54°C. Na fase de arrefecimento, constata-se um pico de energia libertada pela amostra, que corresponde a um pico exotérmico referente à temperatura de recristalização do material, que no material em estudo regista-se nos 121°C de temperatura de cristalização.

Ensaio 2 – pequeno pedaço de um provete PPGF20%

Peso da amostra – 29,7mg

Varrimento dos 20°C aos 260°C

Velocidade – 5°C/min.

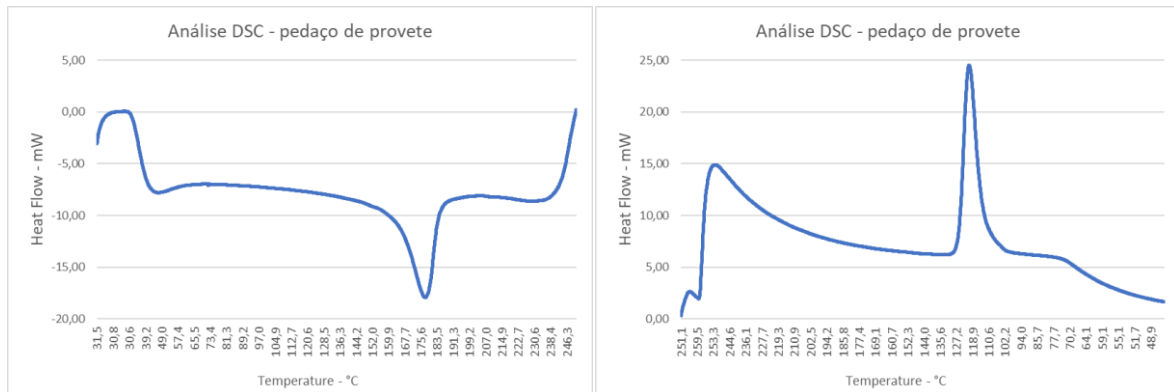


Figura 52 - Gráficos das curvas de aquecimento e arrefecimento da amostra pequeno pedaço de um provete PPGF20%

Na figura 52, entre os 160° e os 185° na fase de aquecimento, observamos um pico na absorção de energia pelo material, este pico diz respeito a um pico endotérmico e é correspondente ao ponto de fusão do material, onde a temperatura de fusão é de 177,70°C. Na fase de arrefecimento, constata-se um pico de energia libertada pela amostra, que corresponde a um pico exotérmico referente à temperatura de recristalização do material, que no material em estudo regista-se nos 120,69°C de temperatura de cristalização.

5.2.3 DUREZA SHORE-D

Foi efetuado o ensaio de dureza shore em dois provetes de tração ao longo do seu corpo e admitindo seis pontos de medição.

Provete 1

Os valores de dureza Shore D medidos no provete 1 (figura 53) foram 51, 55, 53, 53, 64, e 68 perfazendo uma média de 57,33.

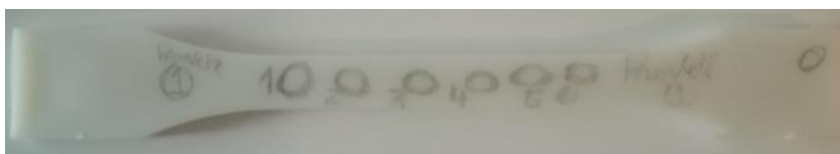


Figura 53 - Provete 1 de tração com os pontos de medição obtidos

Provete 2

Os valores de dureza Shore D medidos no provete 2 (figura 54) foram 62, 64, 64, 62, 63, e 63 perfazendo uma média de 63.

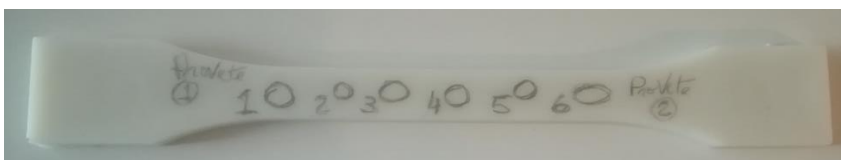


Figura 54 - Provete 2 de tração com os pontos de medição obtidos

5.2.4 ENSAIO DE DENSIDADE

O ensaio de densidade foi efetuado com uma temperatura da água de 20°C, que equivale a um $\rho_{H_2O} = 0,9982\text{g/ml}$, e foram obtidos resultados conforme disposto na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de Densidade às amostras obtidas por injeção plástica

| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 |
|---|-------------|------------|------------|
| Massa da amostra (m_1) | 1,7678 g | 1,7983 g | 1,7834 g |
| Massa da amostra submersa (m_2) | 67 mg | 70,8 mg | 68,9 mg |
| Densidade da amostra ($\rho_{amostra}$) | 1,0375 g/ml | 1,0391g/ml | 1,0383g/ml |

5.2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os valores de tensão à tração e os valores do módulo de elasticidade são obtidos a partir das equações anteriormente mencionadas. Após a obtenção dos valores de tensão-extensão, pode-se obter um gráfico semelhante ao apresentado na figura 55, conforme os valores obtidos em ensaio aos provetes selecionados.

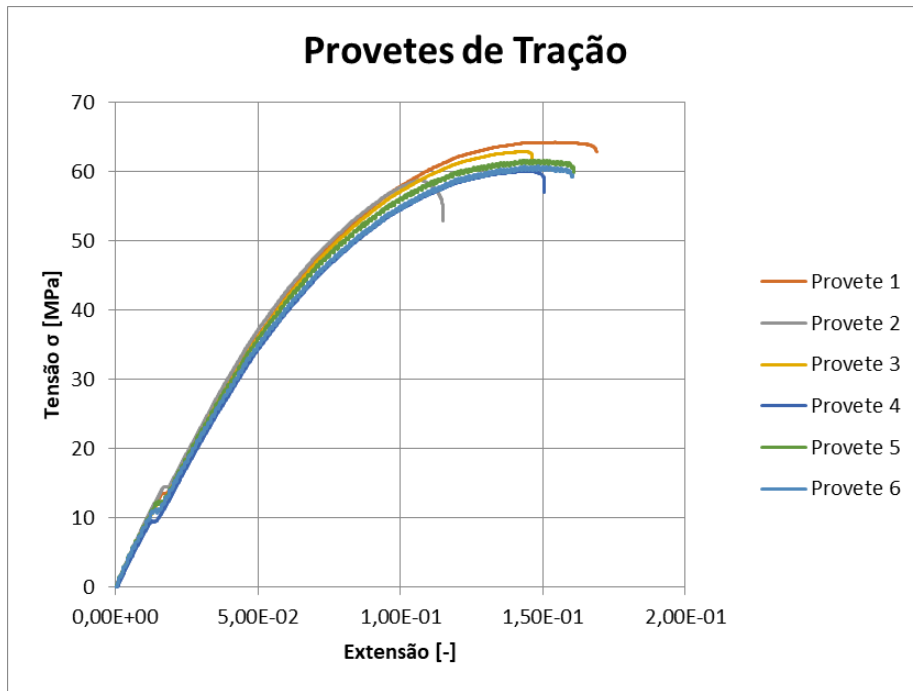


Figura 55 - Gráfico dos provetes de tração

A tabela 7 indica os resultados da tensão máxima à tração, ou seja, a tensão de rutura, que ainda se encontra no domínio plástico do provete antes de avançar para uma extensão maior de tração e antes de chegar ao ponto de rutura. Estes resultados foram obtidos em conformidade com o gráfico da figura 55.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração

| Material | Ensaio | Tensão máx. à tração [MPa] |
|-----------|--------|----------------------------|
| PP + FV20 | 1 | 64,29 |
| | 2 | 58,77 |
| | 3 | 62,95 |
| | 4 | 60,12 |
| | 5 | 61,67 |
| | 6 | 60,79 |

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E O TRABALHO EXPERIMENTAL

As simulações numéricas transmitem como será o percurso do fundido pela cavidade do molde e como tal, durante esse trajeto, o fundido que contenha reforço (como por exemplo a fibra de vidro) terá a sua devida representação da orientação das fibras segundo o trajeto do fundido efetuado na cavidade, assim como, segundo a anisotropia do material em

estudo. Como tal, observando ao microscópio ótico a superfície de dois dos provetes obtidos por injeção é possível fazer uma comparação entre eles e a simulação do numérica.

5.3.1 SENTIDO DO FLUXO DE ENCHIMENTO ANALISADO AO MICROSCÓPIO ÓTICO

Foram observados dois provetes ao microscópio ótico, observaram-se os provetes ao longo de seis zonas e à sua superfície (figuras 56 e 57). Desta forma foi possível ver como o fluxo do fundido flui pela cavidade do molde e perceber como ficam as fibras ao longo da superfície do provete.

Provete 1

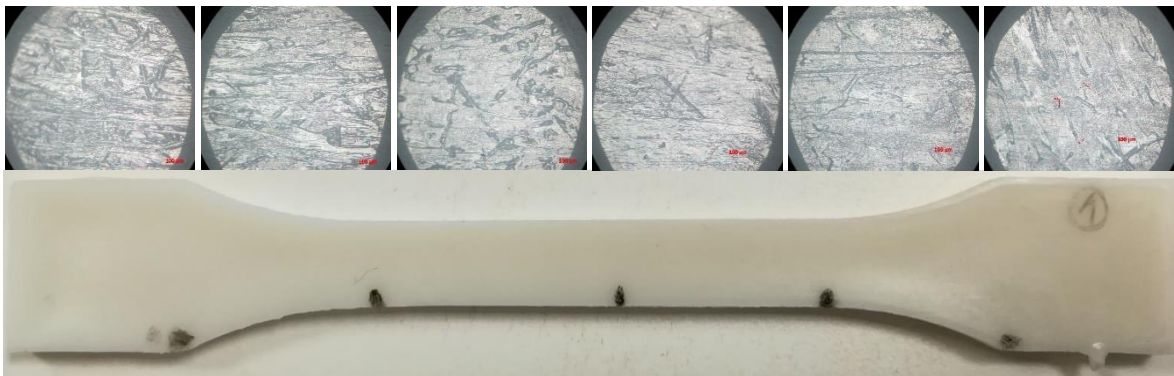


Figura 56 - Sentido do fluxo de enchimento analisado no provete 1 por microscopia ótica (objetiva 10x)

Provete 2

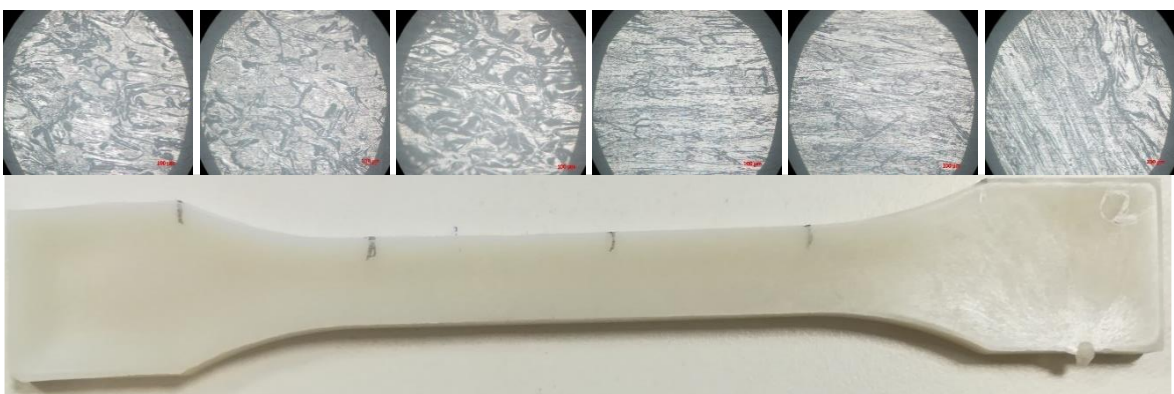


Figura 57 - Sentido do fluxo de enchimento analisado ao microscópio com o aumento a 10x no provete 2

Comparando com os resultados do moldex3D da figura 58, é observado o mesmo sentido de fluxo de enchimento e orientação das fibras. É de notar a mesma turbulência existente no provete de tração, obtido pelo processo de injeção, na zona do ataque à peça assim como no estudo CAE.

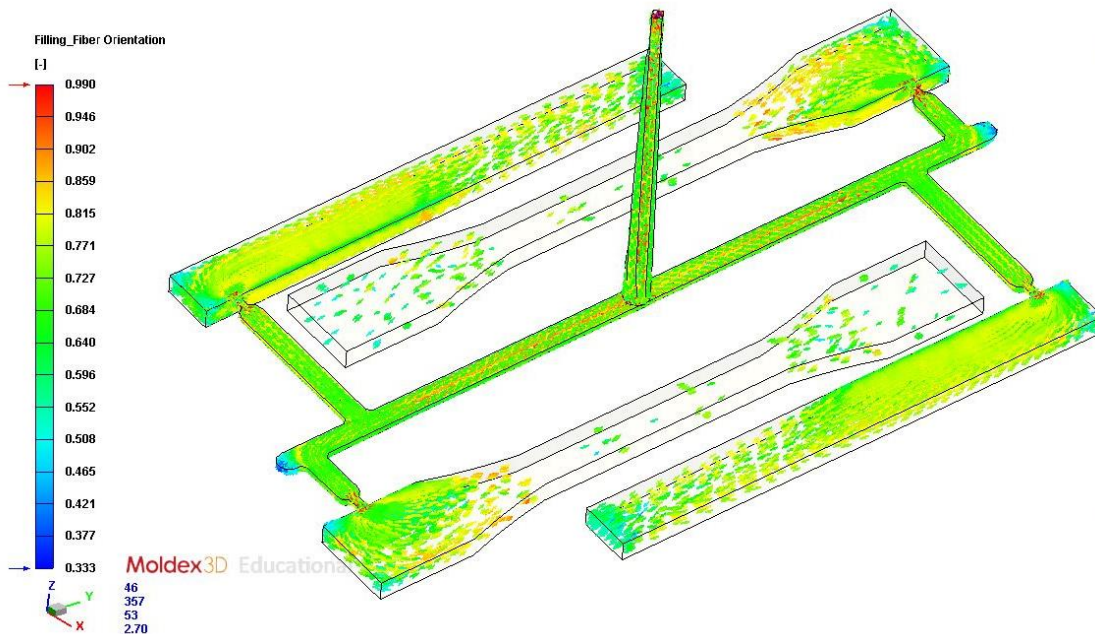


Figura 58 - Fluxo e orientação das fibras através do estudo CAE em moldex3D

5.3.2 ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS SEGUNDO O CÁLCULO NUMÉRICO

Na figura 59, segundo o Moldex3D foram evidenciadas as deslocamentos e/ou orientação da fibra durante o processo de enchimento conforme observado.

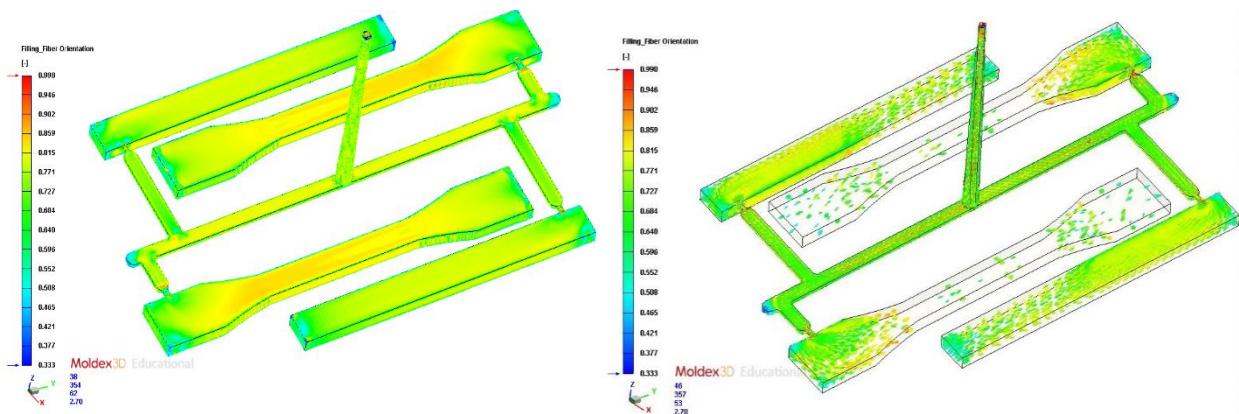


Figura 59 - Orientação das fibras no moldex3D por cálculo de malha normal (à esquerda) e por cálculo de malha BLM (à direita)

Em relação aos resultados CAE obtidos com recurso às metodologias apresentadas no capítulo 3, estes permanecem iguais quer no cálculo com malha normal quer no cálculo com malha BLM. Existindo a exceção dos resultados obtidos no capítulo do *Warpage* das simulações numéricas, ficheiros de visualização e relatórios obtidos nas simulações numéricas com o Moldex3D. Onde existe uma discrepância, em décimos de milímetros, nos empenos das peças e nas direções x, y e z. Dando assim, diferenças na tensão segundo a orientação das fibras obtida durante o processo de injeção plástica.

6 CONCLUSÕES

A orientação das fibras varia com a anisotropia dos polímeros a processar na moldação por injeção, assim como pode variar com as características e variáveis do processo. Evidência de tal é a observação das direções que o fluxo do fundido adota perante a geometria da cavidade a percorrer, quer seja demonstrado ao microscópio ou pela simulação CAE em moldex3D.

Na simulação CAE com o moldex3D, percebe-se que o tempo de cálculo é muito mais rápido num projeto feito com malha BLM do que com malha normal. Nos cálculos CAE, por malha normal ou por malha BLM, escolhendo os métodos matemáticos a aplicar na orientação das fibras, as diferenças obtidas, ainda que mínimas e pouco importantes num projeto de reologia (pois trata-se de diferenças nas casas decimais de milímetros), estão ligadas à estrutura e geometria da peça plástica formada na cavidade do molde. Nomeadamente a nível de empenos da peça, tomando em consideração que uma boa fluidez (bom MFI do material) e orientação das fibras na direção do fluxo do fundido contribui para que uniformemente a peça plástica fique com a geometria desejada no fim do ciclo de injeção.

O ensaio de Análise Mecânica Dinâmica (DMA) possibilitou a determinação da temperatura de transição vítrea do material ($T_g = 157^\circ\text{C}$), um módulo de armazenamento (E') de $6,50\text{E}+08$ Pa com um fator de perda de $\text{Tan } \delta = 0,74$.

No ensaio de DSC verifica-se uma temperatura de fusão de $178,54^\circ\text{C}$ para a amostra de grânulo de matéria prima PPGF20% e uma temperatura de fusão de $177,7^\circ\text{C}$ para a amostra retirada do provete já processado por injeção.

Os resultados no ensaio de dureza Shore D indicam que estamos perante um material com uma característica superficial numa escala de duro com $57,33\text{HS}_D$ a poder chegar à escala do extra-duro com os valores de 63HS_D .

As densidades obtidas das amostras observadas são praticamente idênticas, dando a referência de uma densidade média de $1,0383 \text{ g/cm}^3$, ou seja, a densidade do material processado por injeção é um pouco diferente da densidade de tabela do material de PP com 20% de fibra de vidro, que é de $1,05 \text{ g/cm}^3$ a 23°C pela norma ISO 11883-1/A. A densidade tem uma pequena diferença de $0,0117 \text{ g/cm}^3$ entre a do *data sheet* do material (anexo A) e a obtida a uma temperatura de 20°C .

O ensaio de tração verifica o valor mais alto de tensão de rutura de 64,29MPa, testado no provete nº1, perto do valor de 65MPa mencionado no *data sheet* da matéria prima.

6.1 PARA TRABALHOS FUTUROS:

- Seria interessante a comparação entre a norma da densidade descrita no *data sheet* de um material compósito de matriz polimérica com a utilizada em laboratório. Tentando comparar não só a densidade do polímero no estado fornecido, mas também as densidades de polímeros reprocessados por injeção, ou seja, reciclar por várias vezes esse material, voltar a fazer o processo de injeção, ensaiar a densidade e comparar.

- No seguimento da proposta anterior, avaliar por DSC e/ou outros métodos de estudo, as diferenças existentes na consequência do processo das várias reciclagens e reprocessamentos por injeção do material.

- Simulação numérica com *software* CAE de reologia, para comparação de resultados quer numéricos quer experimentais, onde seria estudada a orientação das fibras e todos o efeitos e resultados inerentes a diferentes ataques à peça plástica no processo de injeção plástica.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Referências bibliográficas

- [1] “No. 1- Reciprocating-Screw Injection”, *Plastics Technology*. [Online]. Disponível em: <<https://www.ptonline.com/articles/no-1---reciprocating-screw-injection>>. [Consultado: 20 de abr. de 2019]
- [2] Timothy W. Womer, “CPlasT, The Evolution of screw design technology for the Injection Molding Process”, *Zhoushan Xutai Machinery*. [Online]. Disponível em: <<http://www.zsxtjx.com/de/index.php?m=&c=Index&a=show&catid=9&id=193>>. [Consultado: 20 de abr. de 2019]
- [3] Timothy W. Womer TWWomer & Associates, “The Evolution of screw design technology for the Injection Molding Process - Part 1”, *Plastics Trends*. [Online]. Disponível em: <<http://www.plasticstrends.com/index.php/40-this-month/this-month-sp-690/320-the-evolution-of-screw-design-technology-for-the-injection-molding-process>>. [Consultado: 20 de abr. de 2019]
- [4] “History of the Plastics Injection Molding Industry”, *International Plastic Laboratories and Services* [Online]. Disponível em: <<https://www.iplas.com/historyofplastics.html>>. [Consultado: 22 de abr. de 2019]
- [5] MITCHELL, Philip, ed. - *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Plastic Part Manufacturing*. Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN NO. 0-87263-456-6
- [6] GOMES, Nuno Miguel Duarte - *A Indústria Portuguesa de Moldes para Plásticos: História, Património e sua musealização*. Coimbra [s.n.], 2005. Dissertação de Mestrado.
- [7] CHANG, Raymond – *Química*. 5ª ed. Lisboa: Mc Graw-Hill, 1994. ISBN: 9789729241680.
- [8] KLEIN, Aloísio; FREDEL, Márcio & WENDHAUSEN, Paulo A. P. – *Novos Materiais: Realidade e tendências de desenvolvimento*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2001.
- [9] SANTOS, Humberto João Saraiva - *Evolução do Uso de Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica: Análise Logística*. Covilhã, 2001. [Online]. Disponível em:

<<http://www.dem.ubi.pt/~humberto/Investiga/html/aula-3.html>>. [Consultado: 26 de mai. de 2019].

[10] MAZUMDAR, Sanjay K. - *Composites Manufacturing – Materials, Product and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0585-3.

[11] COSTA, Carlos Miguel da Silva – *Influência da percentagem de cerâmico, tamanho de grão e matriz polimérica nas Propriedades Dielétricas e Mecânicas de compósitos PZT-PVDF*. Braga: [s.n.], 2007. Dissertação de Mestrado.

[12] SARAIVA, Paula Alexandra da Cruz – *Projeto de um Molde de Injeção*. Leiria: [s.n.], 2016. Dissertação de Mestrado.

[13] CUNHA, A. - *Moldação por Injeção e Materiais Plásticos* (Vol. 2). Marinha Grande: Centimfe, Ed., 2003.

[14] XIE, Lei; SHEN, Longjiang, & JIANG, Bingyan - *Modelling and Simulation for Micro Injection Molding*. InTech. 2011.

[15] PEÇAS, P.; ALMEIDA, P., & HENRIQUES, E. - *A exploração das tecnologias e a competitividade das empresas de moldes* (Vol. 16). O Molde. 2003.

[16] MOREIRA, Marco Manuel Miranda - *Projeto de molde para a injeção de peça plástica complexa para a indústria automóvel*. Porto: [s.n.], 2015. Dissertação de Mestrado.

[17] SHOEMAKER, Jay - *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. Massachusetts, USA: Hanser Gardner Publications, 2006.

[18] GOODSHIP, Vanessa - *ARBURG - Practical Guide to Injection Moulding*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK : Rapra Technology Limited, 2004. ISBN 1-85957-444-0.

[19] MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B. & MAGALHÃES A. G. - *Materiais Compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2ª ed. Porto: Publindustria, 2009. ISBN 9789728953003.

- [20] VEIGA, Natália Arieira - *Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta INEGI*. Porto: [s.n.], 2014. Dissertação de Mestrado.
- [21] CREMA, L., et al. - Experimental analysis of mechanical proprieties and microestructure of long glass fiber reinforced polypropylene processed by rapid heat cycle injection. *Composites Part A* [Em linha]. (2018) 366-373. [Consult. 13 out. 2019]. Disponível em <<http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.019>>.
- [22] HARPER, C. A. - *Modern Plastics Handbook*. USA: McGraw-Hill. 2000.
- [23] VLACHOPOULOS, John & STRUTT, David - *The role of rheology in polymer extrusion*. Milan, Itália: New Technology for Extrusion Conference, 2003.
- [24] SCHEIRS, J., & LONG, T. E. - *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters*. England: John Wiley & Sons Ltd. 2003.
- [25] CALLISTER, W. D. - *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 5th ed. USA: John Wiley & Sons. 2001.
- [26] COWIE, J. G. - *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*, 2nd ed. UK: CRC Press. 1991.
- [27] BARRERA, M. A., VEGA, J. F., & SALAZAR, J. M. - *Melt flow index on high molecular weight polyethylene: A comparative study of experiments and simulation* (Vol. 174). Journal of Materials Processing Technology. 2006.
- [28] MFI testing: Viscosity Measurement of Thermoplastics Polymers. (s.d.). Obtido em 11 de out. de 2019, de <http://www.pt.bme.hu/futotargyak/44_BMEGEPTAG0P_2013tavasz/b1_mfi_v01.pdf>.
- [29] Cabot Corporation – “Masterbatches, Melt Flow Index”, ficha técnica. USA, 2003.
- [30] MARUJO, Miguel Ângelo Oliveira- *Controlo de defeitos em termoplásticos obtidos por injeção*, Aveiro: [s.n.], 2014. Dissertação de Mestrado.

[31] GODINHO, Francisco de Ornelas - *Optimização de estudos reológicos*, Porto: [s.n.], 2017. Dissertação de Mestrado.

[32] Moldex3D [Online]. Disponível em: <<http://support.moldex3d.com/r16/en/index.html>>. [Consultado: 20 de out. de 2019].

[33] “No. 19 - Injection Molding Simulation” *Plastics Technology*. [Online]. Disponível em: <<http://www.ptonline.com/articles/no-19---injection-molding-simulation>>. [Consultado: 21 de out. de 2019].

[34] Moldex3D [Online]. Disponível em: <<http://www.moldex3d.com/en/about>>. [Consultado: 20 de out. de 2019].

[35] SOUSA, Jorge Miguel Penedo Batista de - *Integration of residual stresses and deformations induced by the injection molding process in structural finite element simulation of polymeric components*. Lisboa, 2015.

[36] Simulflow. [Online] [Citação: 24 de out. de 2019]. <http://www.simulflow.pt/index.php/pt/moldex3d/caracteristicas-pt>.

[37] TSENG, Huan-Chang; CHANG, Rong-Yeu & HSU, Chia-Hsiang - Phenomenological improvements to predictive models of fiber orientation in concentrated suspensions. *Journal of Rheology* [Em linha]. (2013) 1598-1631. [Consult. 18 dez. 2019]. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1122/1.4821038>>.

[38] SHOKRIEH, Mahmood; MOSHEFZADEH-SANI, Hadi - On the constant parameters of Halpin-Tsai equation . *Journal Elviesier*. [Em linha]. (2016) 14-20. [Consult. 18 dez. 2019]. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2016.10.049>>.

[39] ZARE, Yasser - Development of Halpin-Tsai model for polymer nanocomposites assuming interphase properties and nanofiller size. *Journal Elviesier*. [Em linha]. (2016) 69-73. [Consult. 15 dez. 2019]. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.02.010>>.

[40] LEE, Doojin - Local anisotropy analysis based on the Mori-Tanaka model for multiphasecomposites with fiber length and orientation distributions. *Journal Elviesier*. [Em

linha]. (2018) 227-234 [Consult. 22 dez. 2019]. Disponível em <<http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.050>>.

[41] CASSU, Silvana Navarro & FELISBERTI, Maria Isabel - Dynamic mechanical behavior and relaxations in polymers and polymeric blends. *Scielo*. [Em linha]. (2005) [Consult. 28 nov. 2019]. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200017>>.

[42] “Análise Térmica (TG-DSC/DTA)“, O *IPN* - *LED&MAT Meios e Serviços*. [Online]. Disponível em: <<https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/2>>. [Consultado: 28 de nov. de 2019]

[43] “Princípio Funcional de um fluxo de calor DSC“, *Netzsch Thermal Analyses*. [Online]. Disponível em: <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/landing-pages/principio-funcional-de-um-fluxo-de-calor-dsc/>>. [Consultado: 28 de nov. de 2019]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo A – Data Sheet do material em estudo no Moldex3D e no processo de injeção plástica



Hostacom G2 N02

Compounded Polyolefin

Product Description

Hostacom G2 N02 is a glass fiber reinforced PP homopolymer, with low melt flow rate.

This grade is not intended for medical, pharmaceutical, food and drinking water applications.

Product Characteristics

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------|-----|
| Status | Commercial | |
| Availability | Europe | (1) |
| Processing Method | Injection molding | |
| Features | Low melt flow rate. | |
| Typical Customer Applications | Used for standard applications. | |

| Typical Properties | Method | Value | Unit |
|---|---------------|-------|-------------------------|
| Physical | | | |
| Melt Volume Rate (230 °C, 5 kg) | ISO 1133 | 5.5 | cm ³ /10 min |
| Density (23 °C) | ISO 1183-1/A | 1.05 | g/cm ³ |
| Mechanical | | | |
| Tensile Modulus (23 °C) | ISO 527-1, -2 | 4500 | MPa |
| Tensile Stress at Yield (23 °C) | ISO 527-1, -2 | 65 | MPa |
| Tensile Strain at Yield (23 °C) | ISO 527-1, -2 | 4.0 | % |
| Flexural Modulus (23 °C) Tech. A | ISO 178/A1 | 4000 | MPa |
| Impact | | | |
| Charpy Impact Strength, unnotched (23 °C) | ISO 179-1/1eU | 40 | kJ/m ² |
| Charpy Impact Strength, notched (23 °C) | ISO 179-1/1eA | 8 | kJ/m ² |
| Thermal | | | |
| Vicat Softening Temperature B (50 N) | ISO 308 | 125 | °C |
| Heat Deflection Temperature B (0.45 MPa) | ISO 75-1, -2 | 130 | °C |

Product Storage and Handling

- Product should be stored in dry conditions at temperatures below 50°C and protected from UV-light.
- Improper storage may bring damage to the packaging and can negatively affect on the quality of this product
- Keep material completely dry for good processing.

Notes

Typical properties; not to be construed as specifications.

(1) : Here is indicated the region where the material is produced. For importation or demand of a local equivalent grade, please contact our Sales Representatives.