



Determinação de propriedades de materiais não homogêneos através do método de homogeneização

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Ricardo Narciso Lopes

Leiria, Dezembro de 2020



Determinação de propriedades de materiais não homogêneos através do método de homogeneização

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Ricardo Narciso Lopes

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco e do Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben.

Leiria, Dezembro de 2020

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

“Believe in yourself and all that you are. Know that there is something inside you that is greater than any obstacle.”

Christian D. Larson

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

A concretização desta dissertação de mestrado representa um marco muito importante para mim, que só foi possível atingir graças ao apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar meus agradecimentos à minha família, pela contribuição construtiva, pelo apoio, motivação e por sempre acreditarem em mim.

Agradeço também aos meus orientadores, Professor Doutor Joel Vasco e Professor Doutor Rui Ruben pela motivação, orientação, disponibilidade, apoio e partilha de conhecimentos.

A todos os meus professores que contribuíram para a minha formação académica.

Aos meus colegas de curso e aos meus amigos, pela amizade, camaradagem e pelos momentos vividos ao longo do meu percurso académico.

À SimulFlow, por ter disponibilizado uma licença educacional de Moldex3D[®] que permitiu realizar os estudos de enchimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A moldação por injeção microcelular é um processo que oferece inúmeros benefícios à produção de materiais termoplásticos. Redução da massa e custos com materiais são exemplos de alguns desses benefícios. No entanto, apesar das vantagens, ao mudar do processo de fabrico da moldação por injeção convencional para o microcelular, é necessário analisar as novas propriedades mecânicas geradas.

O presente trabalho de investigação tem como principal objetivo a caracterização de plásticos de estrutura microcelular, obtidos pelo processo de moldação por injeção Mucell[®]. Como objeto de estudo é utilizado um dispositivo de extração de veículos todo-o-terreno, fabricado com um polímero reforçado com 30% de fibra. Após o entendimento das técnicas de fabrico, são efetuadas análises estruturais, com a finalidade de obter o comportamento mecânico do material tendo em conta a influencia dos processos de fabrico. No final é feita uma comparação com base nos resultados de simulações estruturais. Antes da execução das simulações, é ainda definida uma metodologia relacionada com a modelação do material e com o acoplamento de *softwares*, de forma a permitir escolher os melhores métodos e parâmetros a utilizar nas simulações, tornando-as o mais próximas possível de condições reais.

De forma a aumentar a fiabilidade das simulações, é utilizado como auxiliar o *software* comercial Digimat[®], que servirá tanto para a modelação constitutiva de materiais, como para estabelecer uma ligação entre o *software* de simulação do processo e o *software* de simulação estrutural.

O processo de injeção Mucell[®] permite obter reduções de massa e de tempos do ciclo de injeção, assim como uma redução da pressão e tempo de compactação, enquanto oferece uma boa estabilidade dimensional. O desempenho mecânico das peças, depende principalmente da redução da densidade pretendida, pois as propriedades mecânicas tendem a diminuir consoante a redução de densidade alcançada. No entanto, isso poderá ser uma vantagem para produtos com características mais flexíveis.

Palavras-chave: Moldação por Injeção Microcelular, Elementos Finitos, Homogeneização de Campo Médio

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Microcellular injection molding is a process that offers numerous benefits to the production of thermoplastic materials. Reduction of mass and of material costs are examples of some of the obtained benefits. However, despite the advantages, when changing the manufacturing process from conventional injection molding to microcellular, it is necessary to analyze the new mechanical generated properties.

The main objective of the present research is the characterization of plastics with microcellular structure, obtained by the Mucell[®] injection molding process. The study is focused on is an extraction device for off-road vehicles, manufactured with a polymer reinforced with 30% fiber. After understanding the manufacturing techniques, structural analyzes are carried out in order to obtain the mechanical behavior of the material considering the influence of the manufacturing processes. At the end, a comparison is made based on the results of FEA structural simulations. Before executing the simulations, a methodology related to material modeling and software coupling is also defined, in order to allow choosing the best methods and parameters to be used in the simulations, making them as close as possible to real conditions.

In order to increase the reliability of the simulations, the commercial software Digimat[®] is used, which will serve both for the constitutive modeling of materials, and to establish a connection between the process simulation software and the structural simulation software FEA.

The Mucell[®] injection process makes possible to achieve mass reductions and injection cycle times, as well as a reduction in pressure and packing time, while offering good dimensional stability. The mechanical performance of the parts depends mainly on the reduction in the desired density, as the mechanical properties tend to decrease depending on the density reduction achieved. However, this may be an advantage for products with more flexible features.

Keywords: Microcellular Injection Molding, Finite Elements, Mean-Field Homogenization

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xvii
Lista de tabelas	xxiii
Lista de siglas e acrónimos.....	xxv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e objetivos	1
1.2. Descrição do documento	2
2. Estado da arte	3
2.1. Moldação por injeção convencional.....	3
2.1.1. Ciclo de moldação por injeção	3
2.1.2. Máquina de moldação por injeção.....	5
2.1.3. Molde de injeção de termoplásticos	8
2.1.4. Plásticos.....	10
2.2. Moldação por injeção <i>lightweight</i>.....	12
2.2.1. Agentes químicos de expansão.....	12
2.2.2. Agentes físicos de expansão	13
2.2.3. Injeção assistida por fluído (gás e água).....	16
2.3. Mucell®	18
2.3.1. Princípios fundamentais do processo	18
2.3.2. Materiais compatíveis.....	21
2.3.3. Nitrogénio Vs. Dióxido de Carbono	22
2.3.4. Aspetos económicos do processo Mucell®	22
2.4. Simulação numérica	25
2.4.1. Engenharia assistida por computador	25
2.4.2. CAE na moldação por injeção de termoplásticos.....	26
2.4.3. Simulação do processo de moldação por injeção convencional.....	27
2.4.4. Simulação do processo Mucell®	29
2.4.5. Modelação de materiais	30
2.5. <i>Mean-Field Homogenization</i>	31

3. Caso de Estudo - Metodologia Experimental	37
3.1. Descrição da peça	39
3.2. Materiais	40
3.3. Softwares.....	42
3.3.1. Siemens NX®	42
3.3.2. Moldex3D®	42
3.3.3. ABAQUS/CAE	44
3.3.4. Digimat®	44
3.3.5. Digimat-MF.....	45
3.3.6. Digimat-MAP.....	47
3.3.7. Digimat-CAE	49
3.4. Metodologia de acoplamento de <i>softwares</i>	49
4. Procedimento experimental.....	53
4.1. Criação do modelo 3D.....	53
4.2. Análise estrutural com material com propriedades isotrópicas	56
4.2.1. Definição do material	56
4.2.2. Tipo de análise	57
4.2.3. Condições fronteira	57
4.2.4. Condições de carga.....	58
4.2.5. Definição da malha.....	58
4.2.6. Análise estrutural e interpretação de resultados	60
4.2.7. Modificação do ficheiro da malha estrutural.....	61
4.3. Simulação do processo	62
4.3.1. Sistema de alimentação	62
4.3.2. Estrutura do molde	67
4.3.3. Sistema de refrigeração	68
4.3.4. Cálculo da malha de injeção.....	70
4.3.5. Seleção do material	72
4.3.6. Parâmetros do processo	73
4.3.7. Sequência das etapas da injeção	74
4.3.8. Simulação do processo convencional e interpretação de resultados	75
4.3.9. Simulação do processo Mucell® e interpretação de resultados	85
4.4. Criação do modelo do material	90
4.4.1. Criação do modelo do material para análise da porosidade	96
4.5. Mapeamento da orientação das fibras e da distribuição microcelular	99
4.6. Criação de modelo único para integração.....	101

4.7. Análise estrutural com material com propriedades anisotrópicas	103
4.7.1. Análise estrutural com influência do processo de moldação por injeção convencional.....	104
4.7.2. Análise estrutural com influência do processo Mucell®	106
5. Discussão de resultados	109
6. Conclusões	117
6.1. Sugestão para desenvolvimento futuro.....	118
Referências Bibliográficas	119
Anexos.....	129
Anexo I – Patente Maxxtraxx.....	130
Anexo II – Tabela Synventive.....	131
Anexo III – Ficha técnica do Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30.....	132

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ciclo de moldação por injeção. Adaptado de [3].	4
Figura 2.2 - Constituição da máquina de injeção [4].	5
Figura 2.3 - Máquina de injeção horizontal de parafuso alternativo. Adaptado de [6].	6
Figura 2.4 - Tipos de máquinas de injeção. Adaptado de [5].	7
Figura 2.5 - Molde típico de duas placas com uma cavidade e respetiva peça plástica produzida por este [8].	8
Figura 2.6 - Estrutura típica de um molde de duas metades, com uma cavidade e uma linha de separação. Adaptado de [11].	9
Figura 2.7 - Formas de classificação dos materiais plásticos. Adaptado de [13, 15, 17].	11
Figura 2.8 - Estrutura microcelular de uma amostra de um provete de PP. Adaptado de [21].	12
Figura 2.9 - Diagrama de transições de fase do nitrogénio. Adaptado de [24].	14
Figura 2.10 - Etapas do processo de formação de espuma polimérica com PBA. Adaptado de [18].	15
Figura 2.11 - Exemplos do tipo de peças produzidas com a tecnologia FAIM [2].	16
Figura 2.12 - Esquema do processo FAIM: (a) injeção de polímero, (b) injeção de fluido auxiliar e compactação, (c) extração da peça. Adaptado de [29].	17
Figura 2.13 - Esquema do processo FAIM com recurso à técnica (A) short-shot e (B) full-shot. Adaptado de [28].	17
Figura 2.14 - Disposição típica do equipamento que constitui o processo Mucell®. Adaptado de [32].	19
Figura 2.15 - Áreas potenciais de economia de custos. Adaptado de [39].	23
Figura 2.16 - Comparação de valores de pressão entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®. Adaptado de [39].	24
Figura 2.17 - Comparação do tempo de ciclo entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®. Adaptado de [23].	24
Figura 2.18 - Economias e retornos do investimento do processo Mucell®. Adaptado de [39].	25
Figura 2.19 - Diagrama geral típico do processo de injeção. Adaptado de [7].	27
Figura 2.20 - Exemplo de um fluxograma típico de uma simulação virtual de um processo de injeção. Adaptado de [43].	28
Figura 2.21 - Análise do processo Mucell® efetuada pelo Moldex3D® e as etapas que a constituem. Adaptado de [47].	30
Figura 2.22 - Diagrama exemplo do tipo de análises computacionais que podem ser feitas a uma peça moldada por injeção. Adaptado de [47].	31
Figura 2.23 - Conceito de homogeneização para um material celular. Adaptado de [56].	33

Figura 2.24 - Esquema de homogeneização MFH. Adaptado de[61].	34
Figura 2.25 - Descrição do problema de inclusão simples [61].	35
Figura 3.1 - Sequência das etapas deste caso de estudo.	38
Figura 3.2 - MAXTRAX RECOVERY TRACKS [63].	39
Figura 3.3 - Dimensões da peça de estudo [64].	39
Figura 3.4 - Interface FEA do Moldex3D® [70].	43
Figura 3.5 - Interface gráfica do Digimat® [74].	45
Figura 3.6 - Esquema do funcionamento do módulo Digimat-MF [73].	46
Figura 3.7 - Esquema do funcionamento do módulo Digimat-MAP [73].	47
Figura 3.8 - Ilustração da tolerância de mapeamento considerada ao redor de cada elemento [73].	48
Figura 3.9 - Importância da utilização das tolerâncias no mapeamento [73].	48
Figura 3.10 - Esquema do funcionamento do Digimat-CAE [73].	49
Figura 3.11 - Metodologia de acoplamento de <i>softwares</i> .	50
Figura 4.1 - Etapas de design da peça: (a) ilustra um quarto inicial da geometria, (b) ilustra a operação “espelho”, (c) ilustra a segunda operação “espelho” que dá origem à geometria final da peça [64].	54
Figura 4.2 - Espessura média da peça de estudo [64].	54
Figura 4.3 - Ângulo de saída da peça de estudo [64].	55
Figura 4.4 - (a) adição de <i>ribs</i> , (b) adição de raios de canto [64, 78].	55
Figura 4.5 - Comportamento do material [80].	56
Figura 4.6 - Gestor de etapas do ABAQUS/CAE [80].	57
Figura 4.7 - Condições fronteira [80].	57
Figura 4.8 - Condições de carga [80].	58
Figura 4.9 - Tamanho do elemento da malha e respetivos parâmetros [80].	59
Figura 4.10 - Elemento tetraedro quadrático de 10 nós C3D10 [81].	59
Figura 4.11 - Configurações do tipo de elemento [80].	59
Figura 4.12 - Malha estrutural [80].	60
Figura 4.13 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades isotrópicas [80].	60
Figura 4.14 - Análise de tensões <i>Von Mises</i> [80].	61
Figura 4.15 - Modificação do ficheiro *.inp do ABAQUS/CAE.	62

Figura 4.16 - Ilustração da peça do caso de estudo, dos canais de injeção e de refrigeração no Moldex3D® [70].	63
Figura 4.17 - Caracterização do sistema de alimentação [70].	64
Figura 4.18 - Valores para a proporção da distância de fluxo de alguns materiais utilizados no processo de moldação por injeção [85].	65
Figura 4.19 - Disposição dos bicos de injeção no Moldex3D® [70].	66
Figura 4.20 - Dados gerais para o design do sistema de alimentação [84].	66
Figura 4.21 - Simulação da estrutura do molde utilizada nas simulações do processo [70].	67
Figura 4.22 - Propriedades principais do material das zonas moldantes [70].	68
Figura 4.23 - Ilustração do sistema de refrigeração [70].	68
Figura 4.24 - Boas práticas implementadas na disposição dos canais de refrigeração [78].	69
Figura 4.25 - Representação da malha BLM na peça em estudo [70].	70
Figura 4.26 - Cálculo do tamanho de elemento e o rácio de offset BLM [87].	71
Figura 4.27 - Aspeto geral da malha utilizada para a simulação do processo de injeção [70].	72
Figura 4.28 - (a) Propriedades mecânicas, (b) Condições de processamento, para o Ultramid® A3EG6 [70].	73
Figura 4.29 - Variação térmica do molde durante um ciclo de moldação por injeção. Adaptado de [89].	75
Figura 4.30 - Simulação da etapa de enchimento no processo convencional. (a) VP Switch 98% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].	76
Figura 4.31 - Simulação da temperatura da frente de fluxo. (a) VP Switch 98% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].	77
Figura 4.32 - Previsão da localização de linhas de soldadura [70].	78
Figura 4.33 - Previsão da localização de bolsas de ar [70].	78
Figura 4.34 - Previsão de chupados [70].	79
Figura 4.35 - Simulação do contributo de cada um dos valve-gates para o enchimento [70].	79
Figura 4.36 - Gráfico da pressão de injeção em função do tempo [70].	81
Figura 4.37 - Perfil da força de fecho em função do tempo [70].	82
Figura 4.38 - Tempo de arrefecimento da peça e dos canais de alimentação [70].	83
Figura 4.39 - Simulação do empeno da peça segundo as direções x, y e z [70].	83
Figura 4.40 - Resultados do empeno total da peça [70].	84
Figura 4.41 - Tensor de orientação das fibras, resultado da simulação do processo convencional [70].	84
Figura 4.42 - Simulação da etapa de enchimento do processo Mucell® com adição de 5% em peso de N ₂ . (a) VP Switch 95% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].	85

Figura 4.43 - Simulação da etapa de enchimento do processo Mucell® com adição de 10% em peso de N ₂ . (a) VP Switch 95% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].	86
Figura 4.44 – Densidade celular. (a) 5% em peso de N ₂ , (b) 10% em peso de N ₂ [70].	87
Figura 4.45 – Linhas de soldadura. (a) 5% em peso de N ₂ , (b) 10% em peso de N ₂ [70].	87
Figura 4.46 - Previsão de chupados. (a) 5% em peso de N ₂ , (b) 10% em peso de N ₂ [70].	88
Figura 4.47 - Gráfico da pressão de injeção em função do tempo [70].	88
Figura 4.48 - Perfil da força de fecho em função do tempo [70]	89
Figura 4.49 - Empeno total com o processo Mucell®	89
Figura 4.50 - Tensor de orientação das fibras, resultado da simulação do processo convencional	90
Figura 4.51 - Parâmetros gerais e de integração [74].	92
Figura 4.52 - Curva elástica da fibra de vidro [74]	92
Figura 4.53 - Curva elasto-plástica da matriz PA66 [74].	93
Figura 4.54 - Parâmetros da fibra de vidro e da matriz PA66 [74].	94
Figura 4.55 - Definição de carregamento mecânico [74].	94
Figura 4.56 - Curva tensão-deformação do modelo homogeneizado resultante [74].	95
Figura 4.57 - Matriz de conformidade, rigidez e constantes de engenharia do modelo resultante do PA66-GF30 [74].	95
Figura 4.58 - Fase <i>Void</i> e respetivos parâmetros de inclusão [74].	97
Figura 4.59 - A definição dos eixos é baseada nos ângulos θ e ϕ , definindo o vetor de orientação p [73].	98
Figura 4.60 - Curva tensão-deformação do modelo PA66-GF30_VD com a inclusão da porosidade [74].	98
Figura 4.61 - Matriz de conformidade e a matriz de rigidez do PA66-GF30_VD [74].	99
Figura 4.62 - Mapeamento da “Malha recetora” [74].	100
Figura 4.63 - Mapeamento da porosidade microcelular [74].	101
Figura 4.64 - Importação do tensor da orientação das fibras para o Digimat-CAE [74].	102
Figura 4.65 - Importação do tensor com a orientação das fibras e a informação da porosidade microcelular para o Digimat-CAE [74].	103
Figura 4.66 - Plug-in Digimat® no ABAQUS/CAE [74, 80]	104
Figura 4.67 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas [80].	105
Figura 4.68 - Análise de tensões S11 ao modelo com material com propriedades anisotrópicas [80].	105
Figura 4.69 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas, com influência do processo Mucell®, com a utilização de 5% em peso de N ₂ [80].	106

Figura 4.70 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas, com influência do processo Mucell [®] , com a utilização de 10% em peso de N ₂ [80].....	106
Figura 4.71 - Análise de tensões <i>S11</i> com influência do processo Mucell [®] e com a utilização de 5% em peso de N ₂ [80].	107
Figura 4.72 - Análise de tensões <i>S11</i> com influência do processo Mucell [®] e com a utilização de 10% em peso de N ₂ [80]	107
Figura 4.73 - Zonas da peça onde ocorrem os picos máximos de tensão [80].....	107
Figura 5.1 - Comparação das zonas e valores estimados das marcas de chupados na superfície da peça. (a) moldagem por injeção convencional, (b) Mucell [®] – 5% em peso de N ₂ (c) Mucell [®] – 10% em peso de N ₂ . 110	
Figura 5.2 - Curvas tensão-deformação dos materiais compósitos, bifásico e trifásico [74].....	113
Figura 5.3 - Representação do elemento utilizado para obter os valores da tensão e da deformação [80]. ...	114
Figura 5.4 - Curva tensão-deformação do material com propriedades isotrópicas.....	114
Figura 5.5 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo de injeção convencional. ..	114
Figura 5.6 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo Mucell [®] - 5% em peso de N ₂	115
Figura 5.7 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo Mucell [®] - 10% em peso de N ₂	115
Figura 5.8 - comparação das curvas tensão-deformação dos quatro casos analisados.	116

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Pontos críticos do CO ₂ e do N ₂ [37].	22
Tabela 3.1 - Diferença entre PA6 e PA66 [68].	41
Tabela 4.1 - Dados da malha utilizada no estudo de enchimento.	72
Tabela 4.2 - Dados gerais da simulação do processo.	73
Tabela 4.3 – Parâmetros dos processos.	74
Tabela 5.1 - Comparação dos tempos de ciclo das três simulações.	109
Tabela 5.2 – Diferença de massa entre a peça produzida pelo processo convencional e o processo Mucell®.	110
Tabela 5.3 – Comparação dos valores das pressões de injeção e forças de fecho.	111
Tabela 5.4 - Comparação de custos entre o processo de moldação por injeção convencional e o processo Mucell®	112

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas e acrónimos

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAE	<i>Computer aided engineering</i>
CBA	<i>Chemical blowing agents</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
DFM	<i>Design for Manufacturing</i>
FAIM	<i>Fluid-Assisted injection moulding</i>
FEA	<i>Finite element analysis</i>
FOD	<i>Fiber Orientation Density</i>
FVM	<i>Finite volume method</i>
GAIM	<i>Gas-Assisted injection moulding</i>
GPPS	<i>General purpose polystyrene</i>
HIPS	<i>High impact polystyrene</i>
MFI	<i>Melt flow index</i>
MFH	<i>Mean Field Homogenization</i>
N ₂	Nitrogénio
PA	Poliamida
PBA	<i>Physical blowing agents</i>
PBT	<i>Polybutylene terephthalate</i>
PCL	Polímeros de cristal líquido
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PVT	Pressão-Volume-Temperatura
REV	<i>Representative elementary volume</i>
SCF	<i>Supercritical fluid</i>
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>
WAIM	<i>Water-Assisted injection moulding</i>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

A redução de matéria prima e de tempo de ciclo no fabrico de produtos termoplásticos é um objetivo constante nos setores da economia como forma de reduzir custos e energia. Devido à sua ampla gama de propriedades e baixa densidade, os polímeros conquistaram um papel predominante em muitas aplicações industriais, pois estes apresentam uma boa relação custo-benefício. Para além disso, estes proporcionam uma alta liberdade de *design* de componentes, pois podem ser moldados de diversas maneiras, misturados e reforçados com fibras, de modo a adaptar as suas propriedades de acordo com as necessidades.

Para ajudar a minimizar esses custos, para além dos métodos tradicionais de moldação por injeção, surgiram outras técnicas para fabricar peças leves de geometria complexa. Uma dessas técnicas é a tecnologia de formação de espuma microcelular Mucell[®]. Esta tecnologia oferece inúmeras vantagens no processamento de componentes termoplásticos. Do ponto de vista do processo, o peso da peça diminui devido à geração de células e permite reduções no tempo de ciclo de até 50%. No entanto, ao mudar do processo de fabrico da moldação por injeção convencional para o Mucell[®], é necessário analisar as novas propriedades mecânicas geradas de forma a obter um bom *design* e fabrico eficiente da peça e do molde correspondente.

Atualmente, existem diversos *softwares* de simulação numérica que permitem não só otimizar o ciclo de injeção, como também ajudam a prever o comportamento mecânico da peça durante a sua vida útil. O Moldex3D[®] é um desses *softwares* com capacidade de efetuar uma análise do processo. Por outro lado, o estudo do comportamento mecânico do produto é feito com recurso a *softwares* de análise estrutural como o ABAQUS/CAE.

Normalmente numa análise estrutural de um material proveniente de uma simulação de processo não é considerado a influência de propriedades, tais como a orientação de fibras ou densidade microcelular. Isto pode levar a uma previsão menos precisa do comportamento mecânico do material. Uma forma de contornar esta situação, pode passar pela introdução de um *software* auxiliar de modelação de materiais como o Digimat[®], para estabelecer uma ligação entre o *software* de simulação do processo e o *software* de análise estrutural.

Tendo em conta o problema apresentado, o presente trabalho de investigação tem como principal objetivo a caracterização de plásticos de estrutura microcelular, obtidos pelo processo de moldação por injeção Mucell[®]. Como objeto de estudo é utilizado um dispositivo de extração de veículos todo-o-terreno, fabricado com uma poliamida reforçada com 30% de fibra.

De forma a cumprir-se o objetivo proposto, inicialmente é feito o design do modelo 3D da peça de interesse com recurso ao *software* Siemens NX[®]. Seguidamente são efetuadas as simulações dos processos de injeção de moldação no Moldex3D[®]. Com auxílio do Digimat[®], as informações relativas aos tensores de orientação de fibra e porosidade microcelular, resultantes das simulações dos processos, são mapeadas para um modelo único a incluir na análise estrutural.

Como resultante da constante passagem de informação entre *softwares*, foi elaborada e implementada uma metodologia de acoplamento.

1.2. Descrição do documento

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, que tem como objetivo enquadrar os temas envolvidos nesta dissertação, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e jornais científicos dedicados à matéria, e o desenvolvimento do trabalho prático, com a referência aos projetos desenvolvidos, soluções encontradas, assim como o tratamento e análise crítica dos resultados.

2. Estado da arte

2.1. Moldação por injeção convencional

A moldação por injeção é uma técnica de processamento de termoplásticos que tem como finalidade produzir peças e produtos de plástico com cadências de produção elevadas e de alta repetitibilidade. De um modo geral, este é um processo cíclico pelo qual um material plástico é transformado ao longo de sucessivas etapas, para que lhe seja conferida uma geometria final. Para o funcionamento normal deste processo, é necessária uma máquina de moldação por injeção com uma unidade de controlo, um molde devidamente fixado, constituído por uma ou mais cavidades, que defina a geometria da peça e finalmente, uma unidade de controlo de temperatura do molde [1].

O processo inicia-se com a alimentação de plástico na forma de granulado, que cai com auxílio da gravidade a partir de uma tremonha, para dentro de um cilindro aquecido. À medida que os grânulos são empurrados para a frente por um fuso, o plástico é empurrado para dentro de uma câmara aquecida, denominada por cilindro, onde é plasticizado. À medida que o fuso avança, o plástico fundido é empurrado através de um injetor que se encontra colocado na entrada da alimentação do molde, até que este preencha todas as cavidades do molde. O molde é levado a uma temperatura definida para que o plástico solidifique após o enchimento deste [2].

2.1.1. Ciclo de moldação por injeção

O ciclo de moldação por injeção é constituído por um conjunto de operações necessárias que ocorrem de forma sucessiva durante a produção de uma ou mais peças. A otimização deste é fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, tendo em conta o elevado investimento em equipamentos, nomeadamente máquinas de injeção, moldes e equipamentos auxiliares [1, 2]. A Figura 2.1 ilustra o carácter cíclico do processo de injeção e as diversas fases que o compõem.

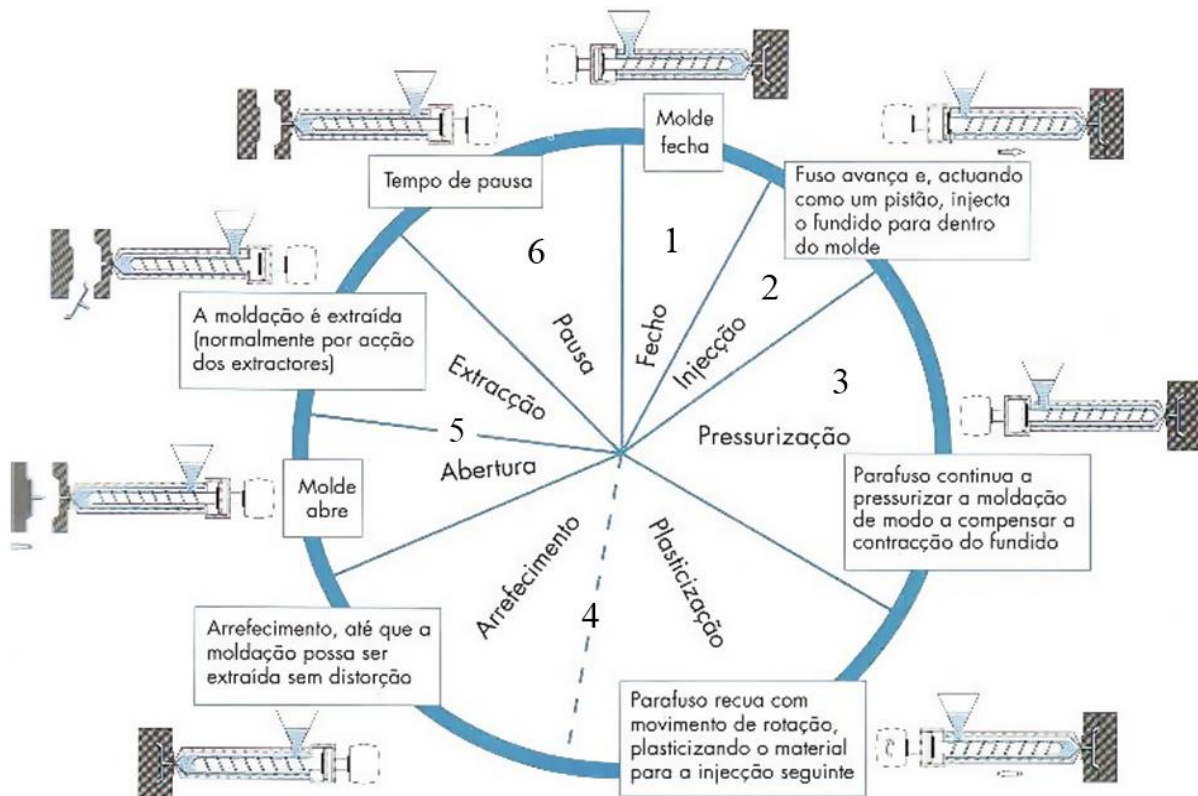


Figura 2.1 - Ciclo de moldação por injeção. Adaptado de [3].

O ciclo de moldação pode ser dividido em 6 fases: fecho do molde, injeção (enchimento da(s) cavidade(s) do molde), compactação/refrigeração, abertura do molde, extração e pausa [3]. A primeira fase do ciclo inicia-se quando o molde é fechado pela unidade de fecho da máquina. Na segunda fase, há um avanço do fuso, que atuando como um pistão, injeta o polímero fundido para o interior do molde. Imediatamente antes do preenchimento total da cavidade do molde, é mantida uma pressão de compactação de modo a compensar a contração do material, o que constitui a terceira fase. Na quarta fase, o fuso recua com movimento de rotação, plasticizando mais material para o próximo ciclo de injeção e em simultâneo, a moldação arrefece até estar a uma temperatura que permita a sua extração sem distorção. Tipicamente, a fase de arrefecimento/plasticização demora cerca de dois terços do tempo total do ciclo [1, 2, 3]. Seguidamente, na quinta fase, o molde abre e ocorre a extração da moldação. Por último, na sexta fase ocorre uma pausa que poderá ser ou não estratégica mediante a utilização de um robot para a extração. Após a pausa, o ciclo recomeça na primeira fase.

As fases do ciclo de moldação são praticamente independentes do tipo de máquina, no entanto, a duração deste pode ser muito diversa, dependendo de fatores como por exemplo,

tamanho e espessura da peça. Para além disso, este poderá desenvolver-se segundo três modos: manual, semi-automático e automático. No modo manual, a sequência de operações é definida e acionada pelo operador (utiliza-se durante as fases de ajuste do processo). No modo semi-automático, a sequência de operações do ciclo desenvolve-se de uma forma automática, mas o início de cada novo ciclo necessita da confirmação do operador (utiliza-se quando o processo requer a intervenção do operador, por exemplo, para ajudar a retirar uma peça). No modo automático, o processo desenvolve-se integralmente segundo uma sequência pré-definida e sem a intervenção do operador. A maximização da produtividade e da repetibilidade só é conseguida em ciclo automático, até porque muitas das funções do controle dos equipamentos mais modernos só estão ativas neste tipo de funcionamento [3].

2.1.2. Máquina de moldação por injeção

Conforme ilustrado na Figura 2.2, a constituição típica de uma máquina de moldação por injeção convencional é baseada em quatro unidades principais: injeção, fecho, comando e potência. As unidades de injeção e de fecho são consideradas essenciais e operam em função das unidades de potência e de comando associadas [3].

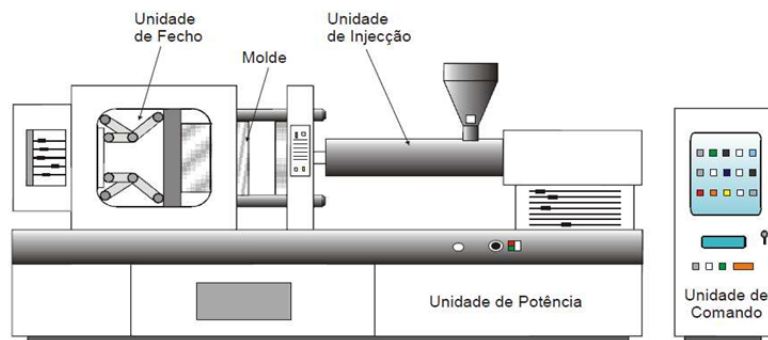


Figura 2.2 - Constituição da máquina de injeção [4].

A unidade de injeção tem duas funções: promover a plasticização do material termoplástico e a subsequente injeção no interior do molde. Dependendo da máquina, as unidades de injeção normalmente são constituídas por um dispositivo de dosagem (tremonha) e um cilindro de plasticização. A tremonha tem como finalidade fornecer ao cilindro de plasticização, a quantidade exata de material necessário (normalmente em granulado ou em pó) para encher o molde. O cilindro de plasticização, aquecido por umas resistências elétricas, promove o aquecimento, plasticização e homogeneização do material. Este pode

ser constituído por um êmbolo (normalmente presente em máquinas mais antigas) ou por um parafuso alternativo (fuso), sendo que esta última opção permite uma melhor homogeneização do material plástico. Uma válvula anti-retorno ajuda a impedir o derrame de material e o bico de injeção permite o fluxo controlado de material para dentro da(s) cavidade(s) do molde [1, 5].

A unidade de fecho, estruturalmente, assemelha-se a uma prensa e tem como finalidade assegurar a fixação e a movimentação do molde, devendo esta ter capacidade suficiente para manter o molde fechado durante as fases de injeção e de compactação. Normalmente, a metade do molde do lado do bico de injeção é fixa e a outra metade é fixada à placa móvel da máquina para permitir a abertura do molde. A placa móvel desliza sobre colunas ou barramentos de maneira que as peças finais sejam extraídas do molde e possam cair por ação da força da gravidade, ou por ação de um *robot* [1, 5].

A Figura 2.3 ilustra uma máquina de injeção horizontal convencional, com uma unidade de injeção baseada num fuso e uma unidade de fecho hidráulica.

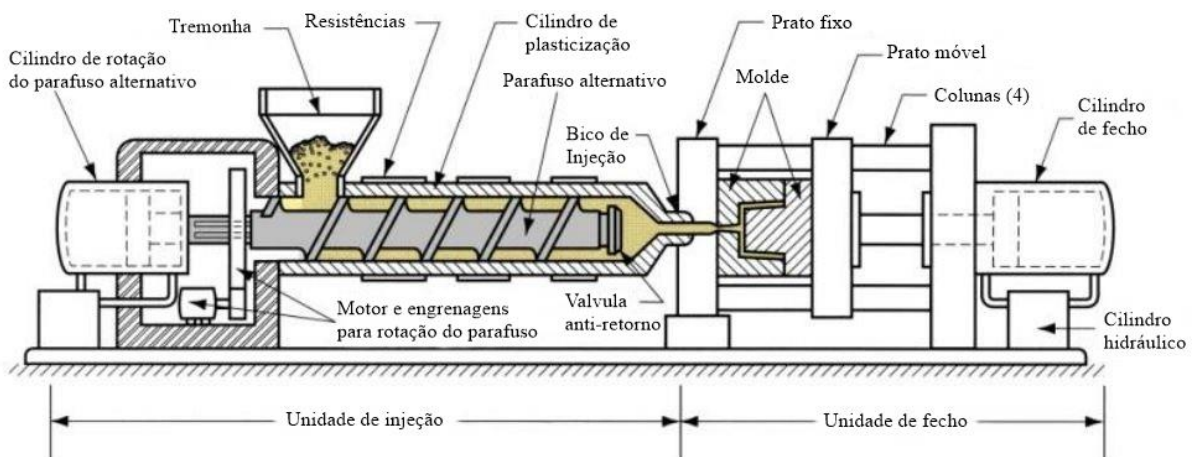


Figura 2.3 - Máquina de injeção horizontal de parafuso alternativo. Adaptado de [6].

A unidade de potência fornece a energia adequada aos diversos atuadores da máquina. Esta é baseada num sistema de pressão óleo-hidráulico, cuja bomba é acionada por um motor elétrico, ou eventualmente baseado num sistema pneumático. Integra também os dispositivos necessários à extração das moldações [1, 5].

A unidade de comando das operações incorpora os dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo. As principais variáveis de

funcionamento são a temperatura do fundido, a temperatura do molde, a pressão de injeção e de compactação, o tempo de enchimento e o tempo de compactação. Assegura, igualmente, a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão da manutenção [1, 5].

A máquina de moldação por injeção também pode ser classificada quanto à natureza dos materiais a processar, quanto ao tipo de acionamento, quanto à dimensão e até quanto aos seus aspetos construtivos. A Figura 2.4 ilustra diferentes tipos de máquinas de injeção. Atualmente as mais encontradas na indústria de transformação de termoplásticos são as que têm a unidade de fecho e injeção dispostas na horizontal (Figura 2.4a), por serem consideradas mais versáteis [5].



(a) Unidades de fecho e injeção horizontais



(b) Unidade de fecho vertical – unidade de injeção horizontal



(c) Unidades de fecho e injeção verticais



(d) Unidade de fecho horizontal – unidade de injeção horizontal

Figura 2.4 - Tipos de máquinas de injeção. Adaptado de [5].

2.1.3. Molde de injeção de termoplásticos

O termo molde refere-se à ferramenta utilizada na produção de peças plásticas por moldação por injeção. Este tem como finalidade produzir uma grande diversidade de peças termoplásticas e pode variar em termos de complexidade mecânica, tipo ou tamanho [7, 8]. Existem diversos tipos de moldes, os convencionais de duas metades, moldes de três partes, moldes com elementos móveis, moldes com buchas rotativas para peças com rosca interior, moldes familiares, moldes multi-componente, entre outros [8, 9]. A estrutura típica e mais simples de um molde é constituída por duas metades, com uma linha de separação (Figura 2.5).

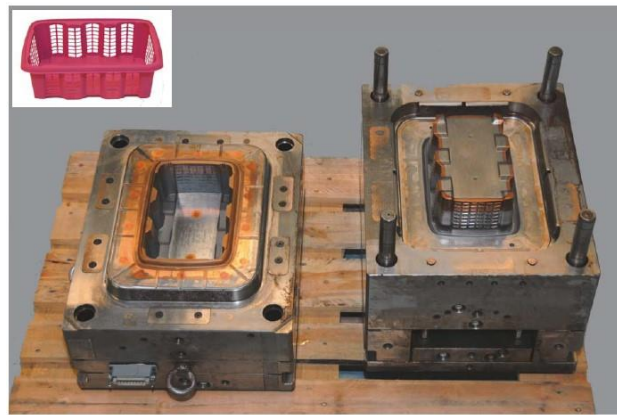


Figura 2.5 - Molde típico de duas placas com uma cavidade e respetiva peça plástica produzida por este [8].

De um modo geral, um molde pode ser considerado como uma estrutura constituída por um conjunto de placas (ou chapas) e blocos espaçadores, cujo número depende do tipo de molde e da complexidade de peça a produzir [8]. Normalmente nas placas são montados ou maquinados os sistemas funcionais, cuja finalidade é permitir que o molde cumpra as suas funções. Os sistemas funcionais de um molde são [10]:

- Zonas moldantes;
- Centragem e guiamento;
- Alimentação;
- Escape de gases;
- Controlo de temperatura;
- Extração.

A zona moldante, constitui o conjunto das várias zonas moldantes, ou seja, é o espaço definido pela conjugação da cavidade, da bucha e de outros elementos moldantes que definem a geometria da(s) peça(s) a produzir [9]. O sistema de centragem e guiamento, permite não só montar o molde da máquina, como também ajustar as duas ou mais partes do molde, assegurando a reprodutibilidade dimensional das peças entre ciclos. O sistema de alimentação, permite a passagem do polímero fundido desde o bico de injeção da máquina até às zonas moldantes, proporcionando o seu enchimento. O sistema de escape de gases permite que o ar existente nas zonas moldantes possa sair, possibilitando o enchimento das mesmas com polímero fundido. O sistema de controlo de temperatura, ou arrefecimento, contribui para um mais rápido arrefecimento das peças injetadas. Finalmente, o sistema de extração, permite efetuar a extração das peças [9, 10].

A Figura 2.6 ilustra com maior detalhe uma estrutura típica de um molde de duas metades, com uma cavidade e uma linha de separação.

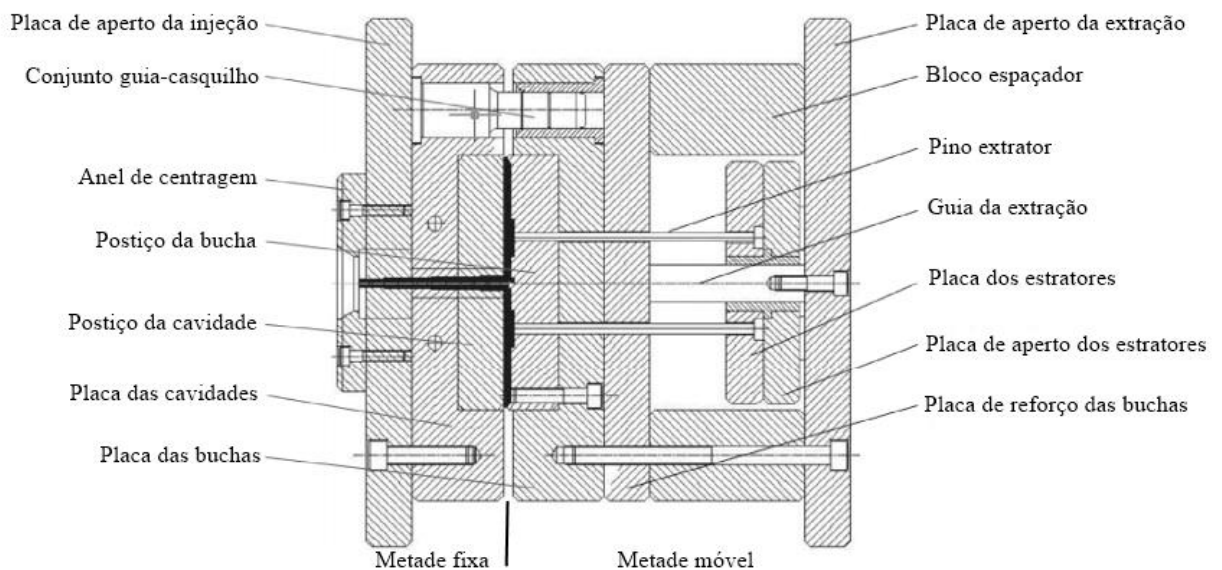


Figura 2.6 - Estrutura típica de um molde de duas metades, com uma cavidade e uma linha de separação. Adaptado de [11].

A metade fixa promove a injeção de material termoplástico e é constituída pelas placas de aperto da injeção e placa das cavidades. A parte móvel promove a extração da peça e é constituída pela bucha, calços, placas de extração e placa de aperto da extração [8, 9].

Normalmente, os moldes de injeção têm custos de fabrico elevados e são utilizados apenas em aplicações de produção volumosa, onde são produzidos milhões de peças. Estes são

tipicamente construídos em aço temperado, aço pré-endurecido, alumínio e/ou liga de cobre-berílio. A escolha do material para a estrutura de um molde é baseada principalmente, no fator económico. Os moldes construídos em aço normalmente têm um custo mais elevado, mas por outro lado têm uma vida útil mais longa, que compensará o custo inicial mais alto em relação a um maior número de peças fabricadas antes de ocorrer o desgaste. Os moldes de aço pré-endurecido são menos resistentes ao desgaste e são usados principalmente para requisitos de menor volume ou componentes maiores. Os moldes cuja estrutura é fabricada em alumínio, custam substancialmente menos que os moldes de aço e podem ser a solução economicamente mais vantajosa para moldar menores quantidades de peças. As ligas de cobre são utilizadas normalmente em zonas específicas do molde que necessitem de dissipação rápida de calor, como exemplo, posições moldantes [12].

2.1.4. Plásticos

Os plásticos são materiais produzidos a partir de uma mistura de polímeros com outros materiais que lhes são adicionados para conferir determinadas características, como por exemplo, a resistência mecânica e a leveza, propriedades muito requeridas em aplicações que vão desde a medicina à engenharia aeroespacial [12]. Estes podem ser fabricados com base nos seus elementos naturais como carvão e água (carbono e hidrogénio), no entanto, por razões económicas atualmente são na sua grande maioria fabricados a partir de produtos sintéticos gerados pela destilação fracionada de petróleo bruto [13]. Os de natureza sintética, são fabricados artificialmente através de processos químicos como a polimerização, policondensação ou poliadição, em que basicamente, as macromoléculas são construídas a partir de moléculas menores (monómeros) ligadas em cadeia. Os monómeros são predominantemente carbono e hidrogénio (carvão e água). Dependendo da repetição ou variedade de monómeros, os polímeros podem ser classificados como Homopolímeros (quando o polímero é formado pelo mesmo monómero ao longo de sua cadeia) ou Copolímero (quando o polímero é formado por pelo menos 2 monómeros diferentes ao longo de toda a cadeia) [14]. Por outro lado, a origem dos plásticos não tem influência no subsequente processamento e podem ser subdivididos em três categorias principais: termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros [13]. A Figura 2.7 ilustra de acordo com o panorama geral da ciência dos materiais [13, 14, 15, 16] os diversos tipos de classificação de polímeros.

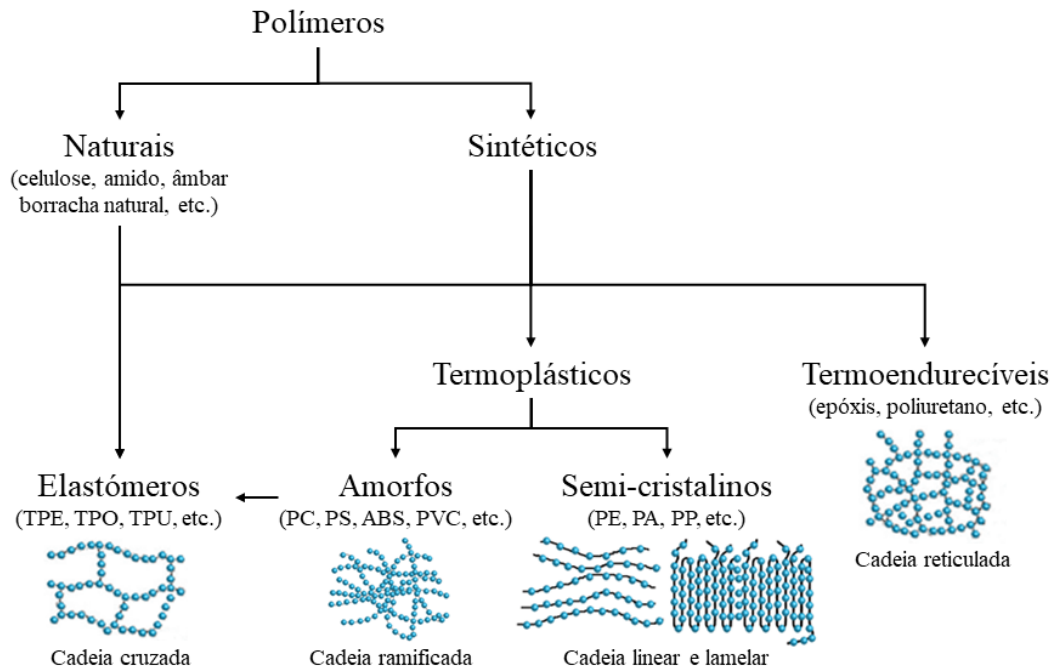


Figura 2.7 - Formas de classificação dos materiais plásticos. Adaptado de [13, 15, 17].

Os elastômeros, também conhecidos por borrachas, podem ter origem natural ou sintética. São produzidos a partir de polímeros unidos por ligações químicas adquirindo uma estrutura final ligeiramente reticulada, que lhes confere um elevado grau de elasticidade e flexibilidade. Estes polímeros podem ser esticados até várias vezes o seu comprimento e retomam rapidamente as suas dimensões originais quando a tensão aplicada é libertada [13, 15, 16]. Dependendo da distribuição e do grau das ligações químicas, os elastômeros podem ter propriedades ou características semelhantes aos termoendurecíveis (borracha natural, silicone) ou aos termoplásticos TPE (*thermoplastic elastomers*) [14]. Os termoendurecíveis tal como os elastômeros, assumem a sua forma definitiva quando processados, e normalmente só podem ser sujeitos a um único ciclo térmico (fusão e subsequente solidificação). Estes são formados por estruturas poliméricas muito ramificadas e a coesão intermolecular também é garantida por reticulações. Os termoplásticos têm a capacidade de suportar vários ciclos térmicos com alguma perda das suas propriedades mecânicas, tendo a capacidade de ser continuamente reprocessados com recurso à adição de material virgem e/ou aditivos. São constituídos por macromoléculas simples lineares ou lamelares (semi-cristalinos) ou ligeiramente ramificadas (amorfo). Normalmente os amorfos têm comportamento elástico e os de estrutura semi-cristalina são caracterizados pelas suas propriedades mecânicas de resistência a tensões ou cargas e pela resistência à temperatura.

São recicláveis e são fáceis de processar através de uma variedade de métodos, tais como a moldação por injeção, moldação por sopro ou extrusão [13, 14, 15, 16].

2.2. Moldação por injeção *lightweight*

O processo de moldação por injeção de espuma microcelular, é uma variante do processo de injeção convencional. De um modo geral, o processo consiste em produzir plásticos por nucleação celular e crescimento de bolhas na matriz polimérica, com a finalidade de obter uma peça com um contorno externo sólido e núcleo poroso [18]. As formas poliméricas microcelulares são produzidas através de dois processos principais, que diferem do método como é introduzido o gás na matriz polimérica. Agentes físicos de expansão PBA (*Physical Blowing Agents*) ou agentes químicos de expansão CBA (*Chemical Blowing Agents*) são predominantemente utilizados para introduzir na estrutura do polímero fundido, um gás que cria a estrutura celular [19, 20]. A Figura 2.8 ilustra uma foto obtida através de um microscópio eletrônico de varrimento SEM (*Scanning Electron Microscope*), de um provete de polipropileno (PP) que representa um exemplo de uma estrutura típica de espuma microcelular.

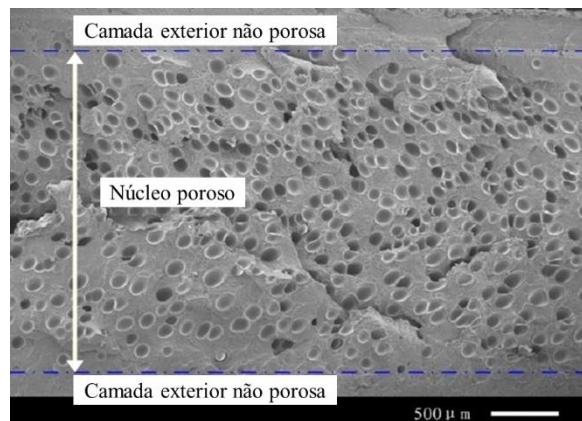


Figura 2.8 - Estrutura microcelular de uma amostra de um provete de PP. Adaptado de [21].

2.2.1. Agentes químicos de expansão

OS CBA normalmente são misturados com o polímero na forma de granulado ou pastilhas na tremonha da máquina de moldação por injeção. Estes são dissolvidos no polímero fundido no interior do cilindro de plasticização. Durante a sua dissolução libertam componentes gasosos por reação química ou decomposição térmica, dando origem a uma solução

monofásica polímero-gás. As reações dos CBA podem ser categorizadas como endotérmicas ou exotérmicas e normalmente libertam nitrogênio (N_2) ou dióxido de carbono (CO_2) após a decomposição. A maioria dos CBA exotérmicos, como a azodicarbonamida, gera N_2 após a decomposição. Por outro lado, o gás primário gerado a partir de CBA endotérmicos, como bicarbonato de sódio e ácido cítrico, é o CO_2 . Os CBA exotérmicos tendem a decompor-se mais facilmente do que os endotérmicos, porque estes geram calor enquanto reagem para libertar o gás, enquanto que os endotérmicos necessitam de calor de reagir. Algumas das vantagens conhecidas dos CBA são, a dosagem volumétrica simples e a possibilidade de utilizar um equipamento já existente de moldação por injeção [18].

A utilização de CBA tem algumas limitações que dificultam a sua implementação em processos moldação por injeção ou por extrusão. Um dos problemas referidos na literatura [18, 22], são a perda das propriedades mecânicas de peças, causado pelo tamanho de bolhas geradas em alguns casos. Os CBA também deixam resíduos químicos no polímero após o processo de moldação. Necessitam de um conjunto de requisitos precisos pois têm limitação de temperatura. O controlo de dissipação do calor extra, gerado por reação química, normalmente torna-se num problema para os cálculos das condições de processamento. Além disso, a decomposição do CBA depende do perfil térmico do processamento e do tempo de permanência sob a temperatura de decomposição, isto é, se for necessária uma temperatura muito alta para desencadear a sua decomposição ou demorar muito tempo para concluir a reação de decomposição, será extremamente difícil a sua incorporação no polímero. Devido a estas limitações, os CBA são menos utilizados para formação de espuma em materiais termoplásticos [22].

2.2.2. Agentes físicos de expansão

Nos processos de formação de espuma física atualmente conhecidos, os PBA são gases introduzidos diretamente na massa de polímero fundido no estado de fluido supercrítico SCF (*Super Critical Fluid*) [18]. Os fluidos supercríticos SCF são gases altamente comprimidos (normalmente só alcançável dentro de cilindros de plasticização) a temperaturas e pressões acima do seu ponto crítico, o que normalmente acontece dentro de um cilindro de plasticização [18, 20]. Estes combinam propriedades gasosas e líquidas e devido à alta compressibilidade que mantém o seu estado, pequenas mudanças de pressão podem produzir mudanças substanciais na densidade que, por sua vez, afetam as propriedades de difusividade, viscosidade e dissolução, influenciando drasticamente a cinética da solução

polímero gás [23]. Tais características aumentam a eficácia da solubilidade do PBA na massa de polímero fundido e ajudam não só a obter uma estrutura mais homogênea, como também permitem uma boa densidade de espuma, mesmo em peças com espessuras de parede mais baixas [20]. Para além disso, é possível ajustar as propriedades dos SCF de acordo com as necessidades do processo, manipulando apenas valores de temperatura e pressão. Note-se que qualquer gás acima da sua temperatura crítica está numa fase gasosa incoercível, portanto, não pode ser liquefeito apenas por pressão [18, 23]. Diferentes tipos de PBA, tais como clorofluorcarbono ou árgon poderão eventualmente ser utilizados no entanto, tipicamente o CO₂ ou N₂ são atualmente os mais utilizados, por serem gases atmosféricos de baixo custo e menos prejudiciais para o ambiente [18, 19, 20, 23]. A Figura 2.9 ilustra o diagrama de fase do N₂.

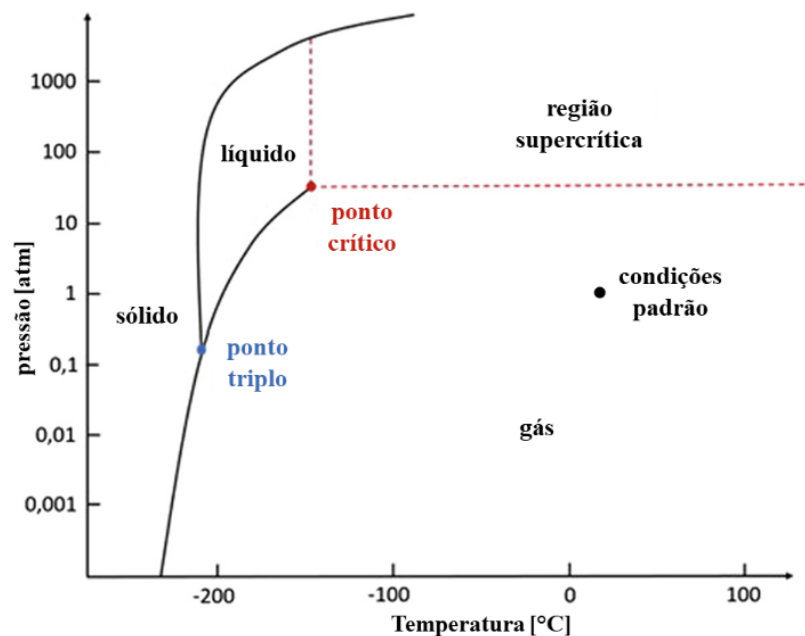


Figura 2.9 - Diagrama de transições de fase do nitrogénio. Adaptado de [24].

A formação de estruturas microcelulares pode ser desencadeada por uma súbita queda de pressão ou por variação de temperatura, que ocorre quando a mistura monofásica polímero-gás transita do bico do injetor para a cavidade do molde, ou seja, quando o SCF retorna ao seu estado gasoso [18, 19, 20]. O diagrama da Figura 2.10 ilustra a caracterização da formação de espuma física e as etapas que a compõem.

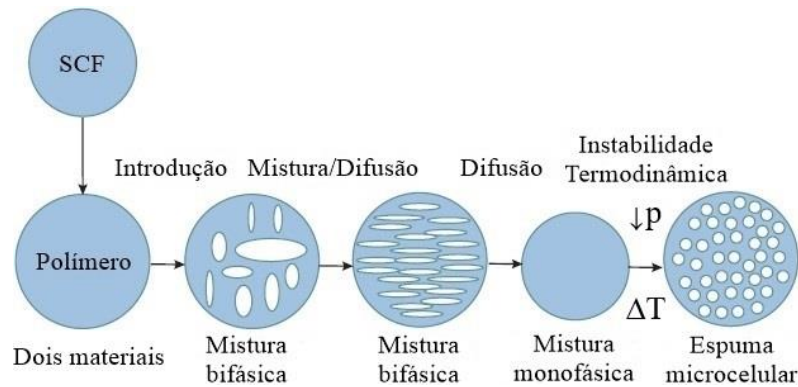


Figura 2.10 - Etapas do processo de formação de espuma polimérica com PBA. Adaptado de [18].

De um modo geral, a formação de espuma física ocorre em quatro etapas [18]:

1. Dissolução de gás: introdução de um SCF na unidade de plasticização que contem um polímero fundido, para formar uma mistura monofásica de alta pressão;
2. Nucleação: Quando a mistura transita do bico da máquina para o interior do molde, ocorre uma queda de pressão ($\downarrow p$) ou uma variação de temperatura (ΔT). Este acontecimento desencadeia a formação de uma grande quantidade de bolhas;
3. Crescimento celular: O crescimento das bolhas e a coalescência ocorrem durante a fase de refrigeração já dentro da cavidade do molde;
4. Modelação: após a solidificação da mistura, a peça adquire a geometria da(s) cavidade(s) do molde.

Normalmente os processos de injeção com PBA, podem ser adaptados para injetar material em moldes, cujo *design* foi concebido para a moldação por injeção convencional, no entanto, por vezes é necessário introduzir algumas modificações ao *design* para tirar mais partido das vantagens deste processo. Isso implica que seja instalado na máquina um equipamento especial, o que requer um investimento inicial elevado, mas que normalmente também resulta de redução de custos em geral [24]. Existem diversos representantes no mercado que utilizam esta técnica para formação de espuma, dos quais, os mais conhecidos são o processo ProFoam[®] (Arburg/IKV), no qual o granulado plástico é enriquecido com o agente expensor numa válvula de granulado e pressionado contra o parafuso que é vedado na parte traseira, e o processo Mucell[®] (Trexel Inc.), onde o agente de expensor é adicionado ao fundido numa unidade de plastificação modificada [20, 25]. Recentemente a Volkswagen AG desenvolveu e patenteou a tecnologia IQ Foam[®], cuja tecnologia consiste em introduzir gás sob baixa-pressão, moderada, juntamente com o material granulado, através duma unidade especial de

duas câmaras, sem que seja necessária nenhuma alteração na geometria do parafuso misturador da máquina de injeção. A Volkswagen AG pretende integrar esta tecnologia no mercado nos próximos anos [26].

Em contraste com os CBA, os PBA não causam problemas relacionados com reações químicas, uma vez que não ocorre decomposição de nenhum agente químico [18]. Como resultado, não ficam resíduos nem no molde nem na peça, o que potencia o aumento da gama de aplicações de peças produzidas por este processo, tais como por exemplo, embalagens de alimentos e produtos médicos [20, 25]. Numerosas investigações e relatórios que comparam a espuma química e física foram preparadas no passado, com conclusões parcialmente diferentes, onde para além da qualidade da superfície do componente, a espuma física tendia a ser um pouco superior em relação à homogeneidade do tamanho e distribuição das células [27].

2.2.3. Injeção assistida por fluido (gás e água)

A tecnologia de moldação por injeção assistida por fluido FAIM (*Fluid-Assisted Injection Moulding*), atualmente pode ser realizada pelo método de injeção direta de água ou gás e é normalmente utilizada no fabrico de peças poliméricas de seção oca e de geometrias complexas, como as ilustradas pela Figura 2.11 [28].



Figura 2.11 - Exemplos do tipo de peças produzidas com a tecnologia FAIM [2].

De um modo geral, o processo consiste em injetar para a(s) cavidade(s) de um molde, um volume controlado de gás ou água a alta pressão, através de um canal próprio, após o fecho do molde e a injeção de um determinado volume de polímero, tal como ilustrado na Figura 2.12 [29].

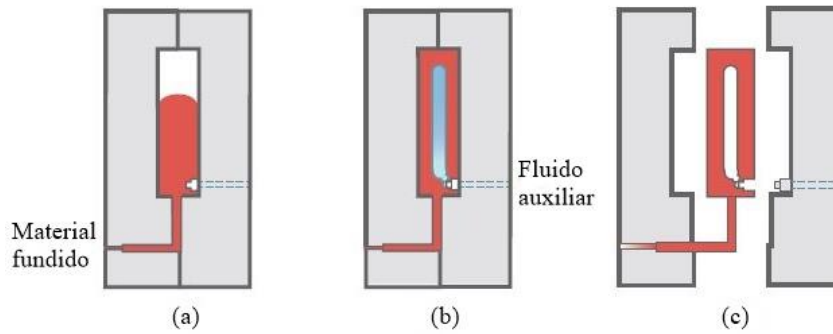


Figura 2.12 - Esquema do processo FAIM: (a) injeção de polímero, (b) injeção de fluido auxiliar e compactação, (c) extração da peça. Adaptado de [29].

A injeção de fluido forçará a expulsão do polímero do núcleo para um reservatório, ficando apenas uma camada exterior em contacto com as paredes das zonas moldantes do molde. Esta expulsão e consequente saída de material do núcleo do polímero é facilitada pelas altas pressões do fluido e pelo facto de o polímero se encontrar ainda em estado viscoso. Nesta tecnologia o preenchimento da cavidade do molde com material polimérico pode ser feito de forma parcial (*short-shot*) ou de forma total (*full-shot*) [28, 29]. A Figura 2.13A ilustra um esquema do processo de injeção FAIM com recurso à técnica *short-shot*, e a Figura 2.13B a técnica *full-shot*.

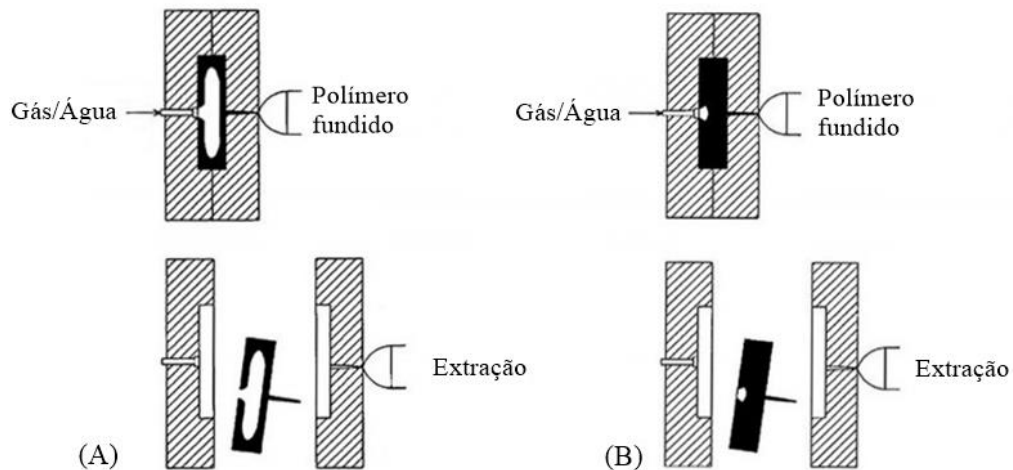


Figura 2.13 - Esquema do processo FAIM com recurso à técnica (A) *short-shot* e (B) *full-shot*. Adaptado de [28].

A tecnologia FAIM com recurso a água WAIM (*Water-Assisted Injection Moulding*), provém do resultado da ampliação do conceito de injeção a gás GAIM (*Gas-Assisted Injection Moulding*), mas com a substituição do gás por água como fluido auxiliar. Normalmente, o N₂ é utilizado como gás assistente no processo GAIM, enquanto que no processo WAIM é utilizada água à temperatura ambiente [13, 29, 30].

Bruder [2] e Wang [29], referem as vantagens e variantes do processo FAIM na produção de componentes poliméricos de seção oca, relatando ciclos de injeção mais rápidos e maior economia de matéria-prima, o que conseqüentemente, aumenta a produtividade, velocidade e sustentabilidade das indústrias de produção de componentes plásticos, dada a capacidade de produzir peças mais leves, de geometria oca e complexa, com desempenho funcional e estrutural semelhante à produção de componentes em massa.

2.3. Mucell®

2.3.1. Princípios fundamentais do processo

Mucell® é atualmente o processo mais conhecido para produção de espuma microcelular com PBA. A tecnologia foi desenvolvida pela primeira vez na década de 1990 no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), em Cambridge, e mais tarde patenteada pela Trexel Inc., que desenvolveu e iniciou a comercialização da tecnologia para processos de moldação por injeção, extrusão e moldagem por sopro [18, 26, 31]. Este processo, segue os mesmos princípios fundamentais da formação de espuma física anteriormente referidos na secção de capítulo 2.2.2., que consistem basicamente na dissolução do SCF, dentro da unidade de plasticização, formando assim uma solução monofásica. Como PBA, são utilizados essencialmente CO₂ e N₂. Mucell® pode ser adaptado numa máquina de moldação por injeção convencional, mediante alguns ajustes na mesma e a implementação de equipamentos adicionais, ou incluído como opção na aquisição de máquinas novas. Para melhor beneficiar das vantagens da tecnologia também o *design* da peça e do molde deve ser ajustado a esta [18, 19, 26]. A Figura 2.14 ilustra uma configuração típica dos equipamentos que constituem a esta tecnologia.

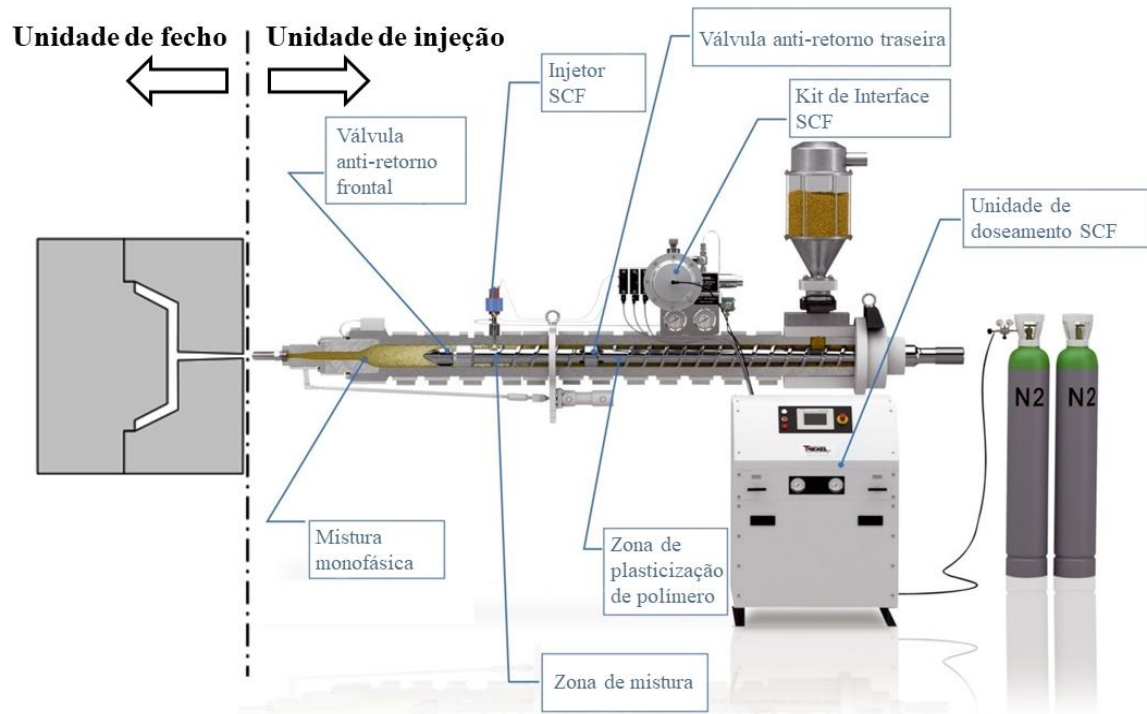


Figura 2.14 - Disposição típica do equipamento que constitui o processo Mucell[®]. Adaptado de [32].

O processo Mucell[®] requer uma unidade de plastificação especial, que integra um fuso, com uma relação comprimento/diâmetro típica de 24, especialmente projetado para otimizar e garantir uma mistura monofásica e a mais homogênea possível. Para além do fuso Mucell[®], esta unidade é constituída por uma zona de plasticização (alimentação, compressão, zona de medição), uma válvula de retenção traseira, que impede que a mistura polímero-gás recue para a zona de plasticização e conseqüentemente ocorra lá a formação de espuma, uma zona de mistura para homogeneização do SCF no polímero fundido e uma válvula de retenção frontal com curso mais curto [33].

O processo pode ser caracterizado numa sequência de etapas únicas [26]. No início do processo o gás inerte é convertido num SCF e doseado pelo sistema de medição. As duas válvulas de retenção abrem para permitir o transporte do polímero fundido para a zona de mistura. Quando a quantidade limite de SCF é atingida, a plasticização de polímero é interrompida. Uma vez que não é transportado mais material, a pressão na zona de plasticização do parafuso diminui. Como resultado da diferença de pressão entre a zona de mistura e a zona de plasticização, a válvula anti-retorno traseira fecha. O kit de interface ajusta a pressão de saída do SCF e seguidamente o mesmo é introduzido na zona de mistura, por um injetor SCF que está montado sobre o cilindro de plasticização à frente da válvula

anti-retorno traseira (no sentido da direção do fluxo). O SCF é finamente disperso na massa de polímero fundido com ajuda do fuso Mucell[®], criando uma solução monofásica polímero-gás. A mistura é mantida sob pressão durante todo o ciclo de forma a garantir o seu estado monofásico, onde, uma eventual queda de pressão nesta fase, resultará na formação de espuma no interior do cilindro de plasticização. Posteriormente a mistura monofásica é empurrada para a zona frontal do fuso. No início da fase de injeção, o fuso move-se axialmente para a frente atuando como êmbolo. A pressão de injeção na zona frontal do fuso causa uma diferença de pressão que faz fechar a válvula anti-retorno frontal. Terminada a fase de injeção, o fuso fica na posição frontal do cilindro de plasticização e ambas as válvulas anti-retorno fechadas. Finalmente, o crescimento celular microscópico ocorre dentro da cavidade do molde durante as etapas de enchimento e de arrefecimento [33]. O próprio crescimento, desencadeado por ação da expansão do gás, já contém a pressão interna necessária para preencher totalmente a cavidade do molde [18, 19, 26].

No processo Mucell[®] tipicamente é alcançada uma redução de viscosidade do polímero fundido, até cerca de 30% (10 a 15% em materiais compostos de fibra de vidro) o que resulta numa redução do tempo de enchimento [23]. A quase eliminação da pressão de compactação também oferece inúmeras vantagens face ao processo de moldação por injeção [18, 19, 26]:

- Contribui para uma diminuição do tempo do ciclo;
- Ajuda obter uma contração mais uniforme do material, que resulta na eliminação de marcas de chupados causadas por esta;
- São eliminadas as deformações induzidas por tensões residuais sem que seja alterada a estrutura química do polímero;
- Dependendo dos sistemas, permite reduzir o requisito de capacidade de tonelagem da unidade de fecho da máquina na ordem dos 50%.

Dependendo dos materiais utilizados, com um *design* da peça (por exemplo redução de espessura de parede) e molde (por exemplo escape de gases) adequados, a economia de material e as reduções de peso são tipicamente na ordem dos 3 a 15%. Estas vantagens, desencadearam a rápida implantação global do processo Mucell[®], principalmente em aplicações na indústria automóvel, eletrónica, dispositivos médicos, embalagens alimentares e bens de consumo [19, 31]. Por outro lado, embora o processo permita produzir peças otimizadas para serem totalmente funcionais, este poderá ter um impacto negativo tanto na qualidade do acabamento e da superfície final, como numa eventual perda de propriedades

mecânicas. Outro aspecto a ter em conta, é o alto investimento inicial requerido na compra em licenças e equipamentos [19, 26, 31].

2.3.2. Materiais compatíveis

A estrutura molecular dos polímeros desempenha um papel fundamental na formação da estrutura da espuma microcelular. Densidade e distribuição molecular, cristalinidade e a transição de fase são propriedades a ter em conta para o processo de formação de espuma [34]. A Trexel Inc. [35] afirma ter conseguido espumar com sucesso praticamente todos os tipos de polímeros, exceto os polímeros de cristal líquido (PCL), por estes apresentarem um índice de solubilidade do SCF muito baixo, limitando assim a aplicação do processo Mucell[®] em tamanhos de injeção maiores que utilizem este material. Materiais cristalinos ou semi-cristalinos como o polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET), tereftalato de polibutileno PBT (*Polybutylene terephthalate*) e poliamida (PA), são utilizáveis para moldagem por injeção microcelular, pois possuem excelentes propriedades para ampla aplicação das indústrias [36]. No entanto, estes materiais têm baixa taxa de solubilidade com os SCF em baixas temperaturas, o que pode comprometer a etapa de arrefecimento em peças de maiores dimensões. Para além disso, essa limitação também faz que por vezes não seja obtida uma estrutura celular uniforme [34, 36].

Por outro lado, a difusividade e a solubilidade, do SCF são mais altas em materiais amorfos. A sua estrutura molecular de distribuição não regular, torna-os mais adequados para as espumas microceculares. Para além disso, os materiais amorfos têm uma faixa de transição vítrea do estado sólido para um estado viscoso mais suave. Normalmente, materiais amorfos produzem peças com camadas exteriores com cerca de 15 a 20% da espessura geral de um componente termoplástico e cerca de 1.5 a 2 vezes mais espessa do que a obtida nos materiais cristalinos. Também têm maior capacidade de difusividade e solubilidade do SCF, o que permite obter espumas termoplásticas de estrutura composta por um tamanho celular menor e mais uniforme, do que os materiais cristalinos. Os materiais amorfos tipicamente utilizados para a produção de espuma microcelular são o poliestireno de uso geral GPPS (General Purpose Polystyrene), policarbonato (PC), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliestireno de alto impacto HIPS (*High Impact Polystyrene*) [28, 30].

2.3.3. Nitrogênio Vs. Dióxido de Carbono

A taxa e a eficácia do crescimento celular da espuma microcelular termoplástica não dependem apenas das condições de processamento (maioritariamente temperatura e pressão) e do tipo de polímero, mas também do tipo de gás e a sua solubilidade no polímero. Tanto o N₂ como o CO₂ são amplamente utilizados como PBA no processo Mucell[®], no entanto, ambos têm comportamentos diferentes e a escolha entre eles depende das necessidades da aplicação. A solubilidade do CO₂ em polímeros é melhor que o N₂, mas o processo e a qualidade das células podem ser mais facilmente controlados com o N₂. A qualidade das células normalmente também é melhor com N₂. Normalmente o N₂ é o gás mais utilizado no processo Mucell[®], porque necessita de uma menor percentagem em peso do que o CO₂, para produzir uma mesma peça termoplástica, o que se reflete em termos económicos [37, 36]. Para além disso, menor quantidade de gás juntamente com menor volume de material injetado pode contribuir para uma redução da pressão na(s) cavidade(s) do molde, deixando mais espaço para o crescimento da espuma microcelular. Uma pressão mais baixa também favorece o processo de nucleação da bolha, na medida em que promove uma maior densidade celular com tamanhos de bolha menores, aumentando as propriedades mecânicas [38].

A Tabela 2.1 contem os valores dos pontos críticos do N₂ e do CO₂, onde P_c representa o valor da pressão crítica e T_c a temperatura crítica.

Tabela 2.1 - Pontos críticos do CO₂ e do N₂ [37].

Gás	Ponto Crítico	
	P _c (kg/cm ²)	T _c (°C)
CO ₂	72.8	31.1
N ₂	3.5	-147

2.3.4. Aspectos económicos do processo Mucell[®]

Do ponto de vista financeiro, embora o equipamento Mucell[®] envolva custos de investimento inicial altos, os custos operacionais são significativamente mais baixos comparando com o processo de injeção convencional [27]. A Figura 2.15 ilustra um gráfico, fornecido pela Trexel Inc. [39], que demonstra, com base em aplicações reais, as diferentes áreas nas quais a tecnologia Mucell[®] contribuiu para uma redução de custos.

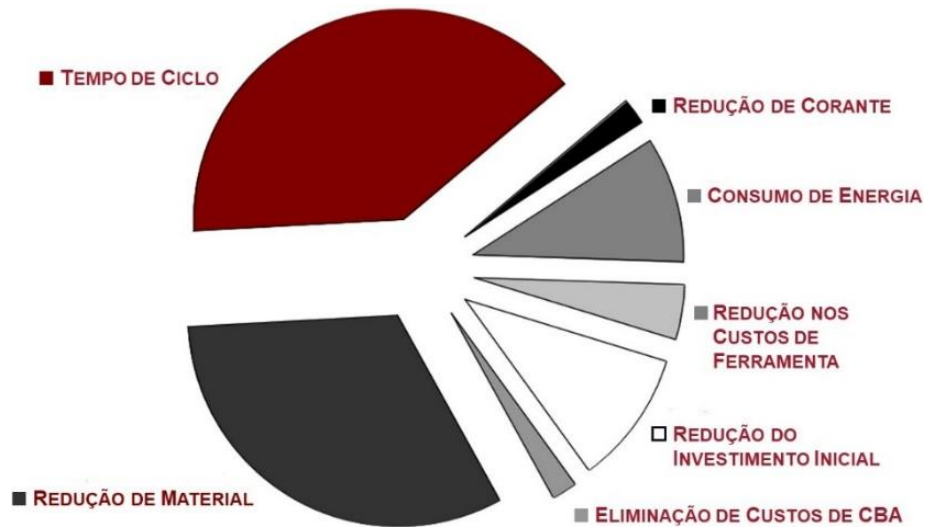


Figura 2.15 - Áreas potenciais de economia de custos. Adaptado de [39].

De acordo com o gráfico, o tempo de ciclo e a redução de material são as áreas que obtiveram os maiores benefícios económicos para as aplicações executadas, no entanto outras reduções de custo significativas incluem a redução de corante, redução de consumo de energia e custos de ferramentas. Embora não mencionado no gráfico, os custos reduzidos do agente expensor e o menor consumo de material, também ajudam na potencial economia dos custos indicados. Para além disso, a baixa viscosidade do material fundido significa operar com pressões mais baixas e conseqüentemente com uma força de fecho significativamente menor (até 50% a menos quando comparando com o processo de moldação por injeção convencional). Como resultado, podem ser utilizadas máquinas mais acessíveis e de tamanhos menores, que ocupam menos espaço e consomem menos energia, sendo estes três fatores determinantes da eficiência no processo de produção [23]. A Figura 2.16 ilustra uma comparação de valores de pressão entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®.

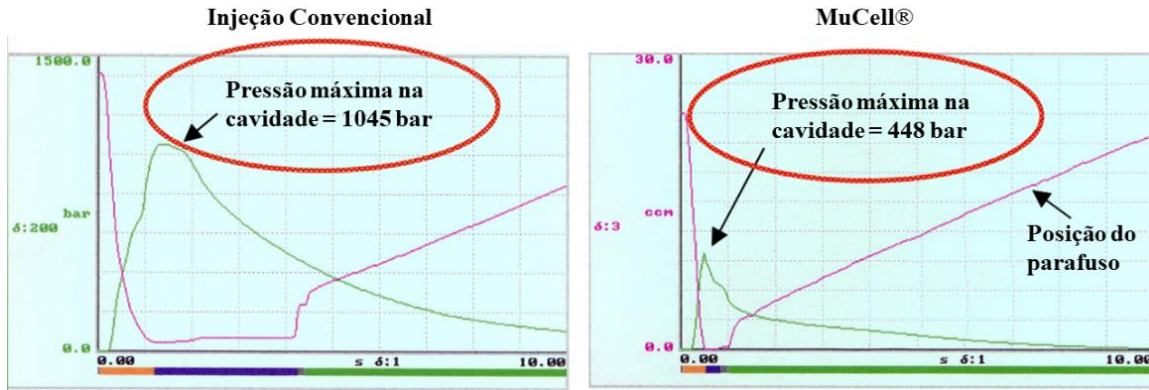


Figura 2.16 - Comparação de valores de pressão entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®. Adaptado de [39].

A tecnologia permite também operar com temperaturas mais baixas do molde e da frente de fusão da mistura polímero-gás. Como resultado o tempo de arrefecimento fica mais curto, o que, combinando com a redução do tempo de enchimento e da eliminação da pressão compactação, contribui para uma diminuição do tempo de ciclo. Em determinados casos, a redução do tempo de ciclo anda na ordem dos 20 a 30%, que por sua vez reduz os custos de capital e aumenta a disponibilidade da máquina de injeção [23]. A Figura 2.17 ilustra uma comparação do tempo de ciclo entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®.

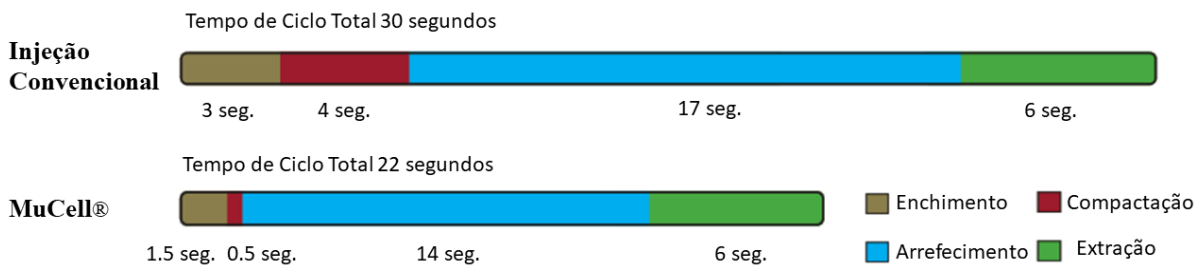


Figura 2.17 - Comparação do tempo de ciclo entre os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®. Adaptado de [23].

A Figura 2.18 ilustra um gráfico fornecido pela Trexel Inc. [39], que contém uma análise geral de economias anuais e retorno do investimento inicial de diversos clientes que utilizaram o processo Mucell® para produzir peças em condições de comercialização. O gráfico apresenta uma economia por ano baseada apenas no tempo do ciclo e na economia

de material. Economias auxiliares, como consumo reduzido de energia ou custo de capital reduzido, não são contabilizadas.

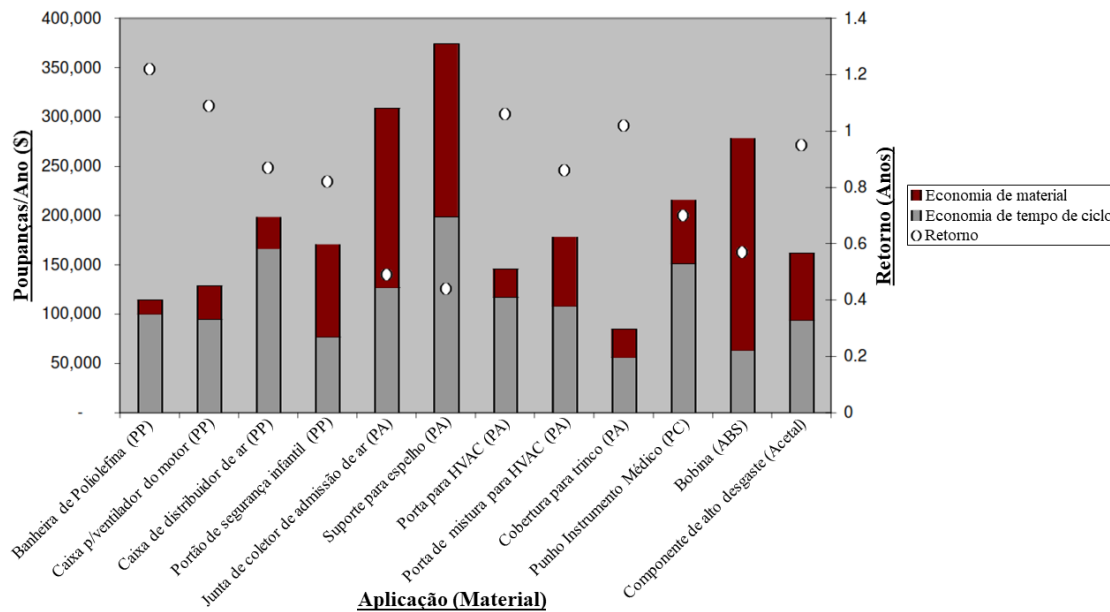


Figura 2.18 - Economias e retornos do investimento do processo Mucell®. Adaptado de [39].

Segundo o gráfico, dependendo do material, do tamanho e da complexidade das peças produzidas, de um modo geral, os períodos de retorno são na ordem dos 0.8 a 1.2 anos para produtos à base de polipropileno (PP), 1 ano para peças tribológicas à base de acetal (Acetal), entre 0.4 e 1.1 anos para peças à base de poliamida (PA) e 0.6 a 0.7 anos para peças à base de policarbonato e ABS.

2.4. Simulação numérica

2.4.1. Engenharia assistida por computador

O CAE (*Computer Aided Engineering*) é um *software* de engenharia assistida por computador que utiliza a simulação numérica para ajudar na otimização de *design* de produtos e processos, ou na resolução de problemas de engenharia [40]. O *software* tem por base o cálculo iterativo de determinados modelos numéricos, que permitem ensaiar virtualmente o comportamento de modelos complexos em condições físicas próximas das reais, como por exemplo, concentrações de tensão numa peça sob determinadas condições de fronteira, ou o comportamento do fluxo de um material termoplástico durante o processo de injeção. Um destes modelos típicos é o método de análise de elementos finitos FEA

(*Finite Element Analysis*), que consiste basicamente em separar um modelo complexo de uma peça numa malha de sucessivos elementos mais pequenos (por exemplo cubos). Em seguida são aplicadas determinadas restrições matemáticas caracterizando como este interage com diferentes fatores físicos subjacentes, como por exemplo, pressão ou temperatura [40, 41]. *Designers* de produtos e engenheiros recorrem ao CAE para auxiliar na realização do grande número de cálculos complexos para solucionar problemas, que normalmente estão muito para além dos métodos por métodos manuais e sem o qual demorariam muito mais tempo [41].

2.4.2. CAE na moldação por injeção de termoplásticos

A dificuldade de garantir a qualidade do produto e o controlo da estabilidade do processo de moldação por injeção de termoplásticos, são os dois principais desafios na prática da indústria de plásticos, no entanto a introdução dos *softwares* CAE tem vindo a prestar um contributo positivo na otimização do mesmo. Simular o processo de moldação por injeção é atualmente viável e indispensável para a previsão de diversos problemas inerentes ao processo de injeção de termoplásticos e ajuda a melhorar e minimizar as não conformidades, o que conseqüentemente irá aumentar a economia e produtividade do processo de moldação por injeção de termoplásticos [7]. Dependendo de fatores como a geometria do componente, das características do molde e das condições de processamento, entre outros, o CAE permite prever virtualmente o comportamento reológico, térmico e mecânico de um componente termoplástico. Na verdade, tais propriedades são altamente dependentes do processo de injeção, pois durante a injeção, são induzidas deformações no componente, tensões residuais internas, propriedades mecânicas anisotrópicas, principalmente na presença de reforços de fibras, ou espumas poliméricas [7, 22]. O diagrama da Figura 2.19 ilustra em que fases do processo de moldação de injeção se deve enquadrar o CAE de forma a maximizar os benefícios obtidos do mesmo.

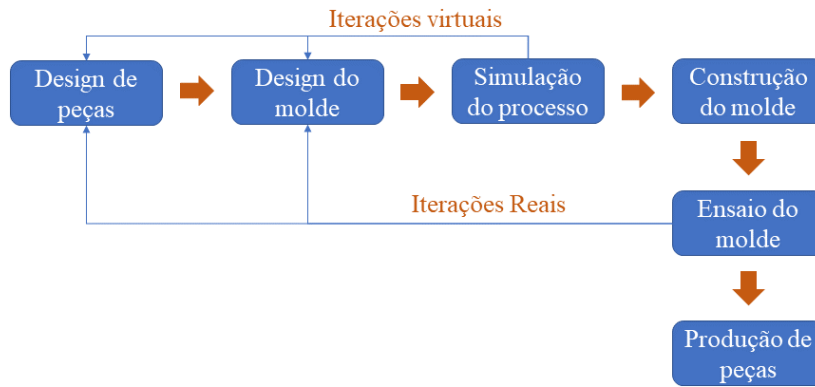


Figura 2.19 - Diagrama geral típico do processo de injeção. Adaptado de [7].

Conforme esquematizado no diagrama, os modelos podem ser testados pelo CAE antes e depois da construção efetiva do molde que vai produzir a(s) peça(s) termoplásticas. As simulações numéricas antes da construção do molde permitem analisar as condições em que este vai operar e mediante os resultados obtidos são determinados os processos de fabrico e tempos de produção. As simulações após o ensaio do molde, têm como finalidade reajustar os processos e implementar melhorias em ambos os modelos [7].

Embora viável, a simulação numérica do processo de moldação por injeção de termoplásticos não é 100% fiável. Um dos principais fatores que contribuem para tal, é o facto de que os resultados obtidos dependem sempre dos parâmetros introduzidos no início do processo de simulação. Tais parâmetros dizem respeito às condições de processamento (por exemplo temperatura e pressão) e estes devem ser reajustados sempre que se verifica falha num determinado critério específico ou quando existem alterações no sistema virtual. Daí nasce a necessidade de iteração [7, 42].

2.4.3. Simulação do processo de moldação por injeção convencional

O tipo de simulações mais frequentemente efetuadas no processo de moldação por injeção, são as reológicas, também designadas por análises de enchimento, que como o próprio nome indica, têm como finalidade simular o escoamento de termoplásticos, durante a etapa de injeção. Atualmente existem no mercado diversos CAE especificamente desenvolvidos para este fim, dos quais se destacam os comercialmente mais utilizados, Autodesk Moldflow[®], Moldex3D[®], ou o Cadmould 3D-F[®]. Adicionalmente estes CAE permitem a integração de módulos específicos que permitem uma análise mais aprofundada de todo o processo de moldação, onde são também simuladas as fases de refrigeração e de pós processamento da

peça, com a finalidade de prever taxas de deformação e de empenos [43, 42]. A Figura 2.20 ilustra um fluxograma que caracteriza as etapas típicas de uma análise mais alargada ao processo de moldação por injeção.

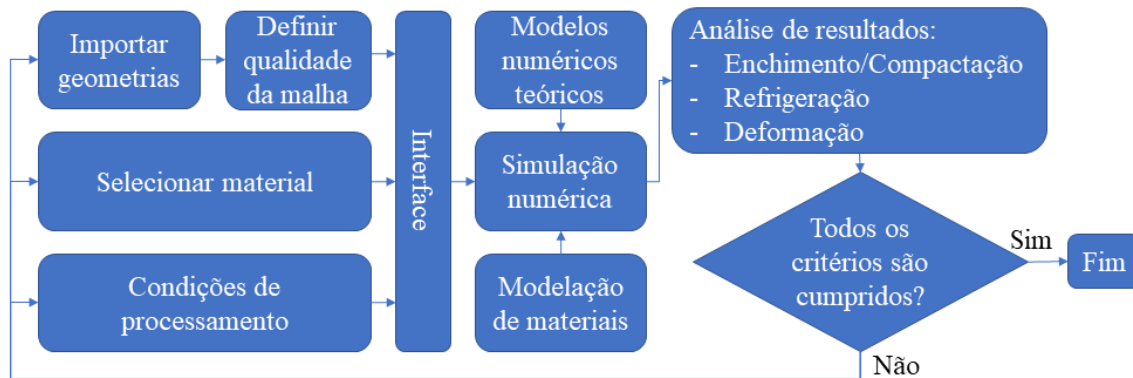


Figura 2.20 - Exemplo de um fluxograma típico de uma simulação virtual de um processo de injeção. Adaptado de [43].

O fluxo de trabalho inicia-se com a importação de um *software* CAD (*Computer Aided Design*) do sistema geométrico geral. As geometrias do sistema, que tipicamente contêm a região da cavidade que será preenchida, o sistema de canais de refrigeração e de injeção existentes no molde. Seguidamente as geometrias são convertidas numa malha de elementos pelo CAE. A qualidade da malha (tamanho dos elementos e quantidade) pode ser ajustada consoante os requisitos da máquina e/ou de projeto e tem um papel fundamental nos resultados. Na fase seguinte, é feita a seleção do material a injetar, cujos dados técnicos, nomeadamente, modelos Pressão-Volume-Temperatura (PVT), viscosidade, cinética de cristalização, condutividade térmica, capacidade calorífica e propriedades mecânicas, normalmente são retirados do banco de dados do *software* para diminuir a probabilidade de erros nesta fase. Os parâmetros computacionais críticos de processamento, são fornecidos ao CAE pelo utilizador e podem ser ajustados para manipular a simulação de injeção consoante a necessidade. Alguns exemplos típicos destes são, velocidade de injeção, força de fecho, temperatura de injeção, temperatura e material do molde, pressão de injeção, diâmetros de canais de refrigeração e injeção, intervalos de tempo para injeções do tipo sequencial, tempos de ciclo, entre outros [43, 42].

Normalmente uma simulação numérica mais alargada do processo de moldação por injeção, passa por três módulos de análise: enchimento/compactação, refrigeração, deformação [43]. O módulo de enchimento/compactação serve de base para os restantes e tem como

finalidade, ajudar a prever a progressão do fluxo de polímero fundido dentro do molde e a pressão de compactação necessária para o processo. Tipicamente, procura-se prever a qualidade do balanceamento dos canais de fluxo de injeção, identificar linhas de soldadura, detetar prisões de ar, localização de chupados, prever fenómenos de hesitação do material e *short-shot*, estimar a pressão e força de fecho necessárias para ajudar a escolher uma máquina de injeção adequada. O módulo de análise de refrigeração tem como finalidade analisar o comportamento térmico do processo e normalmente é possível estimar o tempo de refrigeração necessário, temperatura e eficiência do sistema de refrigeração do molde. A principal função deste módulo é otimizar a fase de refrigeração e reduzir o tempo de ciclo. O módulo de análise de deformação é utilizado na otimização de qualidade e *design* de peças. Com base nos resultados obtidos, é possível prever, se a deformação teórica final da peça estará dentro da tolerância permitida, prever a orientação de fibras em materiais carregados, ou a contração anisotrópica [43, 42].

2.4.4. Simulação do processo Mucell®

O processo de moldação por injeção Mucell® também pode ser previsto, analisado e otimizado através de *softwares* CAE [43]. Para atingir uma meta de redução de peso sem comprometer as propriedades mecânicas das peças termoplásticas injetadas, os resultados das propriedades microcelulares das simulações numéricas fornecem uma boa visão da correlação entre as condições de processamento e a qualidade da peça [44].

A morfologia das bolhas afeta as propriedades mecânicas das peças termoplásticas moldadas. Uma estrutura microcelular fina e com distribuição uniforme pode ser alcançada controlando as condições de processamento da espuma. Dosagem do SCF, redução do peso e velocidade da injeção, são exemplos de condições de processamento que podem ser analisadas [44]. Para cálculo da previsão da morfologia das bolhas existem diversos modelos teóricos de nucleação e crescimento de bolhas [39], no entanto, segundo os autores Zhenhao Xi *et al.* [46], a capacidade de previsão do módulo Mucell® do Moldex3D®, tem produzido bons resultados experimentais na previsão tridimensional da morfologia de bolha com o método dos Volumes Finitos FVM (*Finite Volume Method*).

O diagrama da Figura 2.21 caracteriza uma análise do processo Mucell® feita pelo Moldex3D® e as etapas que a constituem.

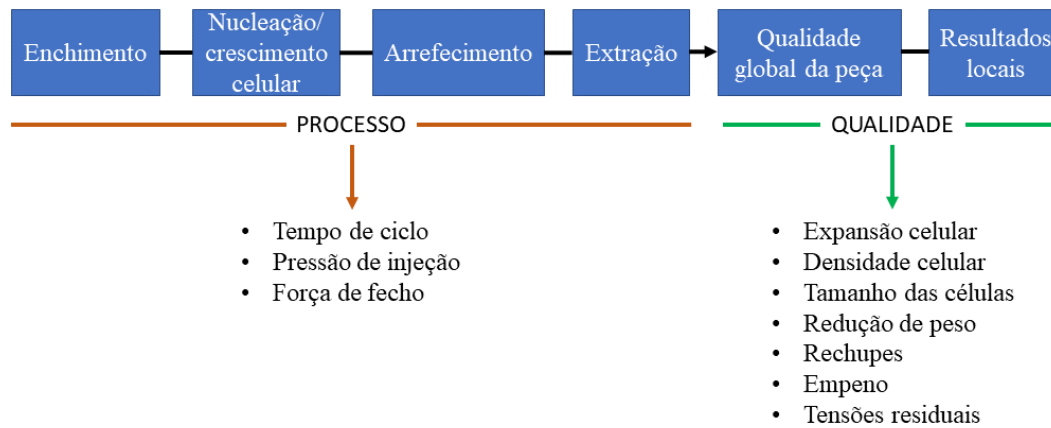


Figura 2.21 - Análise do processo Mucell[®] efetuada pelo Moldex3D[®] e as etapas que a constituem. Adaptado de [47].

Para além de resultados típicos como tempo de ciclo ideal, pressão de injeção ou força de fecho (obtidos no processo de moldação por injeção convencional), o módulo analisa o tamanho da bolha, distribuição celular, retração volumétrica, entre outros. Adicionalmente também é possível prever a localização dos ataques de injeção, interação entre o fluxo de fusão e o desenvolvimento das bolhas, prever os efeitos da estrutura da bolha na deformação das peças e a contração [44]. No entanto, uma limitação deste, é o custo elevado, que poderá não ser viável para todas as empresas [24, 44].

2.4.5. Modelação de materiais

Normalmente numa análise estrutural de um material considera-se que este tem um comportamento mecânico isotrópico. Uma análise estrutural de um componente polimérico nessas condições pode levar a uma previsão menos precisa do seu comportamento mecânico. Assim sendo, devido à crescente popularidade dos materiais compósitos em aplicações industriais, foram desenvolvidas novas estratégias computacionais para aumentar a fiabilidade da análise estrutural, com a finalidade de prever com maior precisão o comportamento mecânico destes materiais com propriedades anisotrópicas [48]. Especialmente em materiais compósitos reforçados com fibras, é importante transmitir ao *software* de análise estrutural FEA, a influência das resultantes do processo de moldação por injeção, como a tensão residual da peça, a orientação das fibras, porosidade microcelular, ou as propriedades mecânicas [49].

Para estabelecer a ligação entre o *software* de simulação de moldação por injeção e o CAE de análise estrutural FEA, são utilizados os *softwares* de modelação de materiais, como por exemplo o Digimat[®], para prever com maior precisão o comportamento mecânico destes materiais com propriedades anisotrópicas [48, 49].

O diagrama ilustrado na Figura 2.22, apresenta um esquema do tipo de análises técnicas que podem ser realizadas a uma peça plástica obtida através do processo de moldação por injeção e em que fase pode ser enquadrado o *software* de modelação de materiais.

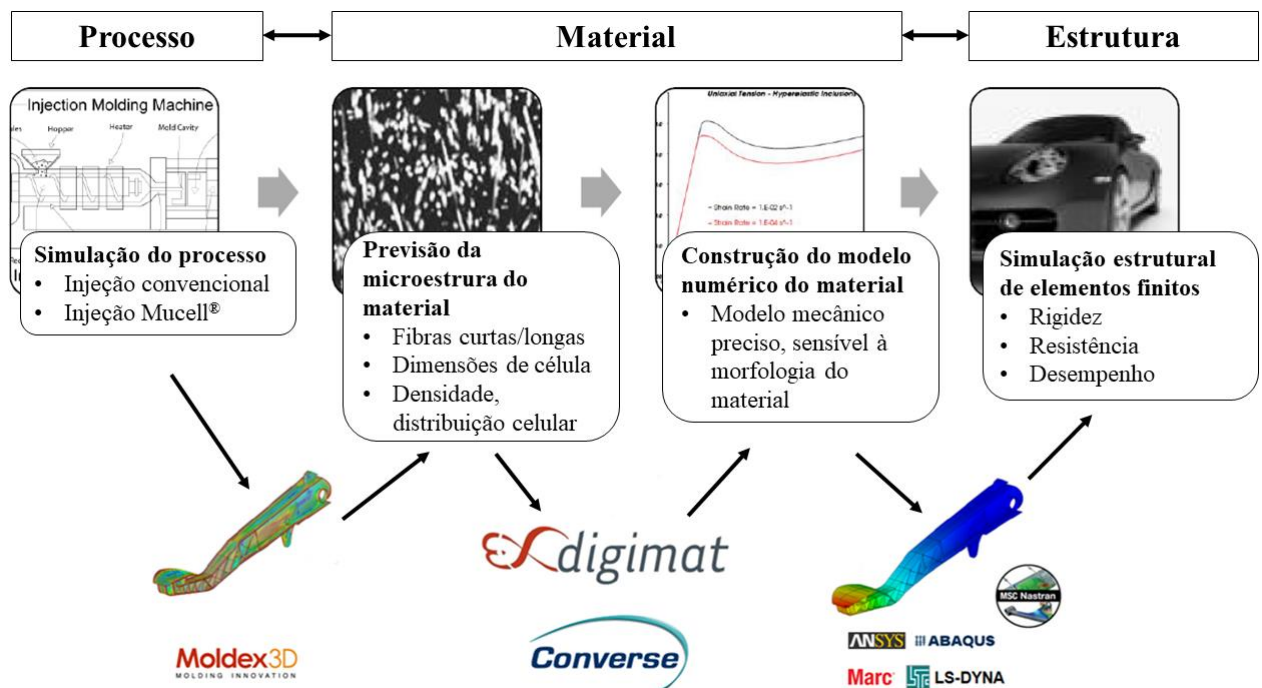


Figura 2.22 - Diagrama exemplo do tipo de análises computacionais que podem ser feitas a uma peça moldada por injeção. Adaptado de [47].

2.5. Mean-Field Homogenization

Tipicamente, a maioria dos materiais compósitos são heterogêneos. Um material heterogêneo pode ser constituído por apenas um material em estados diferentes, ou por dois ou mais materiais homogêneos diferentes, distribuídos de forma periódica ou aleatória [50]. Estes materiais apresentam heterogeneidades e quando são sujeitos a campos de tensão ou deformação, apresentam um comportamento em função das propriedades elásticas que os caracterizam. A aplicação desses campos de tensão/deformação, podem desencadear fenómenos de cedência ou de rotura do material. Assim sendo, é imprescindível conhecer as propriedades do material [51, 52].

É possível através de modelos analíticos ou de modelos numéricos determinar essas propriedades. Normalmente os modelos analíticos são mais utilizados para o cálculo de propriedades de materiais de geometrias mais simples. Para materiais com geometrias complexas, de difícil resolução analítica, normalmente recorre-se a simulações e modelos numéricos para efetuar o cálculo das propriedades elásticas. Um exemplo destes é o método de elementos finitos FEA. No entanto, dado que a precisão dos modelos numéricos é tanto maior quanto maior for o número de elementos da malha global utilizada, numa simulação numérica direta em materiais heterogêneos de estrutura complexa, quando utilizada uma malha de elementos finitos muito finos, isso poderá levar a uma quantidade impraticável de tempo computacional e consequentemente a custos elevados [52]. Para superar essas limitações, têm sido frequentemente utilizados métodos de homogeneização numérica, onde meios heterogêneos são transformados em meios homogêneos para estimar as propriedades mecânicas efetivas equivalentes [53, 54].

A homogeneização das propriedades de materiais compósitos pode ser alcançada pela análise de uma célula unitária, designada por Elemento de Volume Representativo RVE (*Representative Volume Element*), que se repete de forma periódica numa ou mais direções. O RVE é uma representação estatística das propriedades dos materiais. Este deve conter informações suficientes para descrever o comportamento do material considerado. Normalmente a análise do RVE ocorre em duas escalas [55, 56]:

- Escala microscópica – conectada à microestrutura heterogênea;
- Escala macroscópica – onde todo o corpo é considerado como homogêneo.

O meio heterogêneo é substituído por um meio homogêneo equivalente com propriedades homogêneas obtidas a partir de uma análise ao RVE. As análises no domínio macroscópico podem então ser efetuadas com base no meio equivalente homogêneo, o que reduz de forma considerável a dimensão do problema [56].

A Figura 2.23 ilustra de forma esquemática o procedimento, onde um corpo heterogêneo Ω^e de microestrutura periódica, com propriedades elásticas C_{ijkl}^e , é transformado pelo processo de homogeneização para um corpo homogêneo Ω , com propriedades elásticas C_{ijkl}^H .

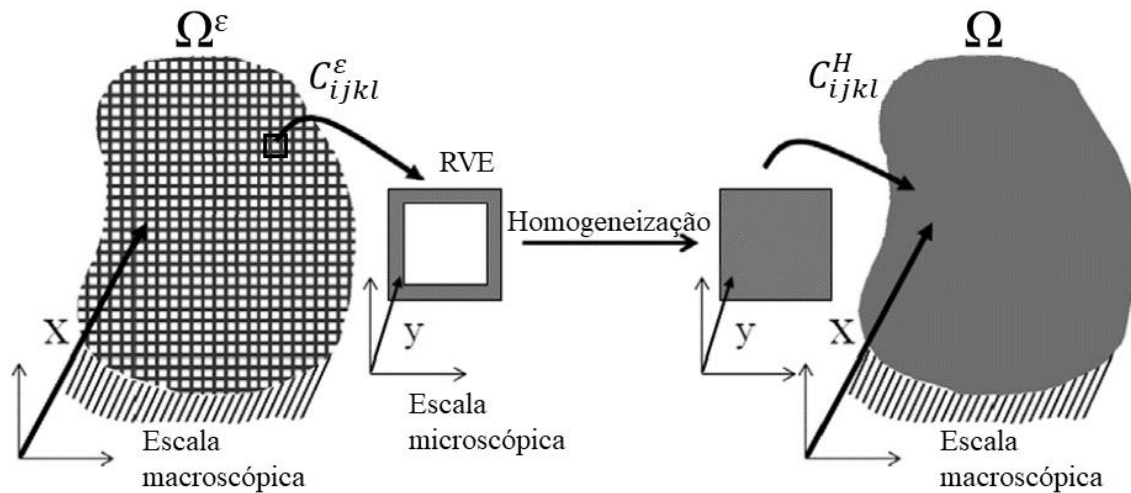


Figura 2.23 - Conceito de homogeneização para um material celular. Adaptado de [56].

Esta abordagem é muito precisa e fornece micro-campos detalhados. No entanto, especialmente para problemas não lineares, é computacionalmente muito caro. Além disso, é necessária a criação de um modelo detalhado de RVE. A preparação da representação discreta da microestrutura do compósito dentro do RVE, também pode levar a dificuldades adicionais. Um método alternativo é o método da homogeneização de campo médio MFH (*Mean Field Homogenization*) [57, 58, 59, 60]. O MFH baseia-se em modelos semi-analíticos e fornece aproximações (com bom grau de precisão) das médias de volume dos campos de tensão e deformação, tanto a nível do RVE (tensões e deformações macrométricas) como para cada fase ao nível microscópico. A principal vantagem do método MFH é a eficiência computacional, pois permite uma maior facilidade de uso, velocidade de execução e uso reduzido da memória do computador. Este serve de base, por exemplo, ao Digima-MF, um módulo do Digimat[®], que será abordado com maior detalhe no Capítulo 3 [61].

Normalmente, o procedimento de homogeneização MFH é dividido em três etapas (Figura 2.24) [61]:

- Na primeira etapa, o tensor de deformação macroscópico dado é localizado em cada fase do material compósito;
- A segunda etapa está ligada à aplicação das leis constitutivas de cada fase. Como resultado, são calculados os tensores de tensão de cada fase;
- Na última etapa, os tensores de tensão das fases são calculados e o tensor de tensão macroscópico é obtido.

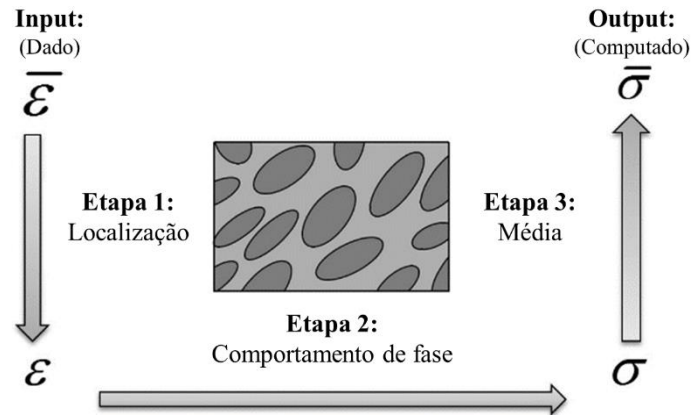


Figura 2.24 - Esquema de homogeneização MFH. Adaptado de [61].

Considerando como exemplo dois materiais compósitos bifásicos, nos quais as inclusões que se estendem num domínio ω_1 e com um volume V_1 , que servem como reforço a uma matriz que pertence a um domínio ω_0 e com um volume V_0 . A fração de volume da matriz e a inclusão podem ser dadas por [61]:

$$v_0 = \frac{V_0}{V} \quad (2-1)$$

$$v_1 = \frac{V_1}{V} = 1 - v_0 \quad (2-2)$$

onde V representa o volume RVE.

A quantidade média calculada sobre o RVE é dada por:

$$\langle f(x, \bar{x}) \rangle = \frac{1}{V} \int_{\omega} (x, \bar{x}) dV \quad (2-3)$$

onde a integração é realizada em relação às micro-coordenadas e (x, \bar{x}) representa o micro campo dentro do RVE.

No caso de compósitos de duas fases, a média do volume RVE pode ser dada por:

$$\langle f \rangle = v_1 \langle f \rangle_{\omega_1} + v_0 \langle f \rangle_{\omega_0} \quad (2-4)$$

Como resultado, as médias de volume do campo de deformação sobre o RVE, a fase da matriz e a fase de inclusão estão relacionadas como:

$$\langle \varepsilon \rangle = v_1 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} + v_0 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} \quad (2-5)$$

As médias de deformação em cada fase são relacionadas por um tensor de concentração de deformação B^ε :

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \langle B \rangle_{\omega_0} \quad (2-6)$$

As médias de deformação por fase são relacionadas com a deformação no campo macroscópico por:

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} = [v_1 B^\varepsilon + (1 - v_1) I]^{-1} : \langle \bar{\varepsilon} \rangle \quad (2-7)$$

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} = B^\varepsilon : [v_1 B^\varepsilon + (1 - v_1) I]^{-1} : \langle \bar{\varepsilon} \rangle \quad (2-8)$$

Nos modelos de homogeneização de campo médio mais relevantes, a solução de Eshelby desempenha um papel fundamental. A solução de Eshelby permite resolver o problema de inclusão simples. Considerando o problema de inclusão simples, um corpo infinito está sujeito a deslocamentos lineares na sua fronteira correspondendo a uma deformação de campo distante uniforme. Conforme ilustrado na Figura, o corpo é feito de uma inclusão elipsoidal (I) de módulo C_1 que está embutida numa matriz infinita de módulo C_0 [61].

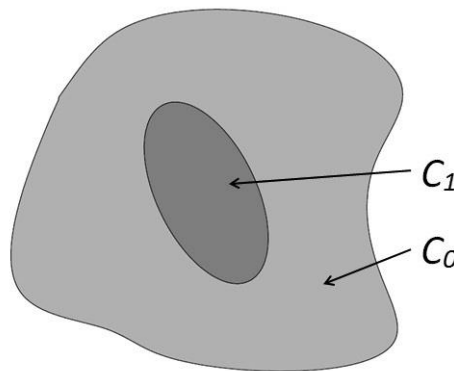


Figura 2.25 - Descrição do problema de inclusão simples [61].

Utilizando a solução de Eshelby, pode-se obter a tensão uniforme dentro da inclusão relacionada com a tensão remota:

$$\varepsilon(x) = H(I, C_0, C_1) : E, \forall x \in (I) \quad (2-9)$$

onde H é o tensor de concentração de deformação de inclusão simples definido por:

$$H(I, C_0, C_1) = \{I + \zeta(I, C_0): C_0^{-1}: [C_1 - C_0]\}^{-1} \quad (2-9)$$

onde $\zeta(I, C_0)$ representa o tensor de *Eshelby*.

Por outro lado, o modelo de homogeneização de Mori-Tanaka, e o qual será utilizado em cálculos posteriores no caso de estudo desta dissertação, assume que o tensor de concentração de deformação B^ε , é igual ao tensor de concentração de deformação do problema de inclusão única H [61]. Segundo Benveniste [62], cada inclusão comporta-se de forma isolada na matriz, vendo a deformação média da matriz como uma deformação de campo distante.

3. Caso de Estudo - Metodologia Experimental

Tal como referido em 2.4.2., a simulação numérica é um recurso valioso que pode ser utilizado antes da construção efetiva do molde, para ajudar a garantir a qualidade de peças termoplásticas, reduzir tempo e custos de produção. Após o *design* da peça de interesse num *software* CAD, esta também pode ser objeto de estudo antes mesmo da fase de *design* do molde. Isto porque os resultados das simulações irão ajudar a fase de *design* do molde, por exemplo, qual a configuração do sistema de injeção, as localizações dos ataques, quantidade e dimensões, ordem e sequencia de injeção mais adequada, se for caso disso. Isso irá permitir posteriormente um *design* do molde mais preciso e com maior qualidade. Independentemente de ainda ser necessário algum trabalho de afinação do molde na fase dos ensaios, quando o molde já estiver em fase de produção de peças, a probabilidade de erro será menor e haverá mais garantias que as peças irão ser produzidas de acordo com os requisitos pretendidos.

Neste caso de estudo, foi criada uma metodologia de acoplamento e utilização de *softwares* para auxiliar o projeto e a conceção de moldes para injeção de materiais termoplásticos. O fluxograma Figura 3.1, ilustra de forma simplificada a sequência das etapas que caracterizam essa metodologia e a forma como esta se enquadra em condições reais.

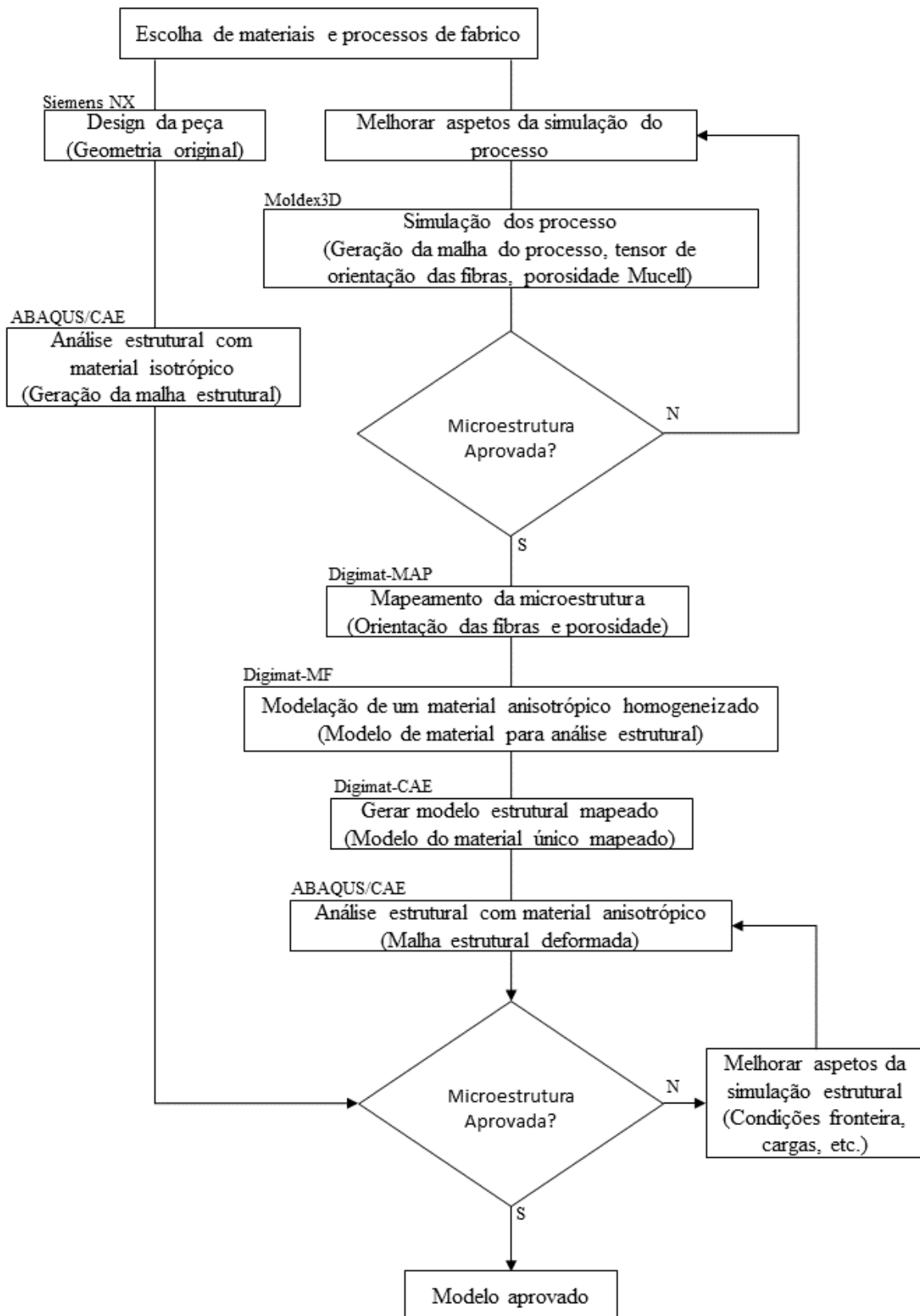


Figura 3.1 - Sequência das etapas deste caso de estudo.

3.1. Descrição da peça

A peça em estudo (Figura 3.2) trata-se de um dispositivo de extração e recuperação de veículos todo-o-terreno, que pode ser transportado por estes facilmente, ajudando na saída caso o veículo fique preso em terrenos de lama, areia, entre outros.



Figura 3.2 - MAXTRAX RECOVERY TRACKS [63].

O modelo 3D utilizado neste caso de estudo, difere um pouco da peça original, pois o modelo original está protegido por uma patente, que pode ser consultada no Anexo I. No entanto a patente contém um desenho técnico da peça, o qual serviu como base para *design* do modelo CAD.

Relativamente à sua morfologia, é uma peça com uma forma geométrica retangular, com 1150 mm de comprimento, 330 mm de largura, 42,5 mm de altura e uma espessura média de 5 mm Figura 3.3. A sua massa é de aproximadamente 3.2 kg.

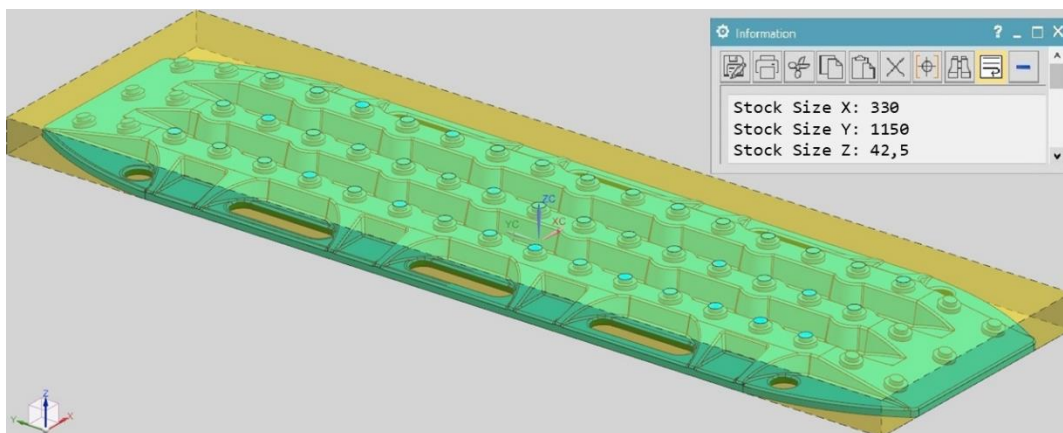


Figura 3.3 - Dimensões da peça de estudo [64].

3.2. Materiais

De acordo com a patente, o material utilizado no fabrico da peça deste caso de estudo é o *nylon*. *Nylon* é uma palavra genérica que representa uma classe de polímeros comumente conhecida por Poliamidas (PA). As PA são polímeros cristalinos de alto peso molecular e estão entre as famílias de polímeros mais utilizadas dentro do grupo dos polímeros de engenharia, devido ao seu excelente equilíbrio entre desempenho e custo. Este material normalmente é escolhido para substituição de metal, porque permite criar peças resistentes e ao mesmo tempo leves. Dentro dos vários tipos de PA que existem, os mais utilizados são a Poliamida 6 (PA 6) e Poliamida 66 (PA66). Cada tipo é frequentemente descrito por um número, como por exemplo nylon 66 ou PA66. Os sufixos numéricos referem-se ao número de átomos de carbono presentes nas estruturas moleculares da amina e do ácido, respetivamente, ou um único sufixo se os grupos amina e ácido fizerem parte da mesma molécula. De um modo geral, estes dois tipos de PA são bastante semelhantes, mas cada um tem benefícios diferentes em aplicativos específicos. O PA6 é processado a uma temperatura mais baixa e tem uma menor contração do molde. O material em si é leve, tem um acabamento brilhante e é ideal para aplicações em que a tenacidade, a resistência ao impacto e o acabamento superficial são importantes. Por outro lado, o PA66 tem um ponto de fusão mais alto e é frequentemente utilizado em aplicações que requerem alta resistência mecânica e rigidez sob condições de calor ou químicas que requerem boa estabilidade do material [65, 66].

No entanto, as propriedades mecânicas do *Nylon* mudam significativamente dependendo das condições de trabalho, nomeadamente em ambientes com humidade. As peças de *Nylon* seco obtidas por qualquer processo de fabrico, estão sujeitas a mudanças dimensionais causadas pela absorção de água, cristalização, alívio de tensões e expansão ou contração térmica. Esse fator deve ser tomado em consideração durante a fase de projeto, onde o ambiente de trabalho certamente determinará as propriedades mecânicas finais da peça resultante e seu comportamento esperado. Por outro lado, para ajudar a manter a estabilidade dimensional do material, a fibra de vidro como material de reforço é comumente utilizada para aplicações que requerem propriedades mecânicas médias ou altas quando a humidade é controlada e reduzida com precisão. A combinação de ambos pode dar origem a um polímero reforçado como o PA66-GF30. PA66-GF30 é um PA66 reforçado com 30% de fibra de vidro, que tem propriedades mecânicas superiores à poliamida bruta, tornando os materiais adequados para

operações de alta carga estática por longos períodos e para condições de trabalho com temperaturas mais elevadas, devido às propriedades térmicas das fibras de vidro. Como as fibras de vidro tendem em alguns casos a ter um efeito abrasivo acentuado nas superfícies de contato, o PA66-GF30 é menos adequado para aplicações deslizantes [67]. A Ensinger [68], por exemplo, fabrica o PA66-GF30 com o nome comercial TECAMID 66 GF 30 black, que contém um aditivo na cor, que tem como finalidade melhorar a proteção UV para aplicações de resistência ao clima ao ar livre. Todas essas propriedades tornam o PA66-GF30 um bom candidato em aplicações de engenharia mecânica, como as indústrias automóvel, aeronáutica e aeroespacial.

Com base na literatura [68], a Tabela 3.1 apresenta uma comparação das principais propriedades de quatro tipos de poliamidas.

Tabela 3.1 - Diferença entre PA6 e PA66 [68].

Propriedade	PA6	PA6 GF30	PA66	PA66 GF30
Módulo de Young ISO 527-1/-2 (MPa)	3200/1000	9800/6100	3600/1600	10500/7000
Resistência ao impacto (Charpy) ISO 179/1eA a 23°C (kJ/m)	10/20	12/20	12/15	10/15
Temperatura de fusão (°C)	260-280	270-290	275-295	280-300
Temperatura do molde (°C)	80-90	80-120	80-90	80-120
Fluidez	Geralmente melhor		Faixa de fusão mais estreita	
Taxa de cristalização (=arrefecimento/tempo de ciclo)	Mais lento (tempos de arrefecimento/ciclo mais longos)		Mais rápido (tempos de arrefecimento/ciclo mais curtos)	
Desgaste no equipamento durante o processamento	Muito baixo	Moderado	Muito baixo	Maior do que PA6 GF
Qualidade da superfície	Normalmente melhor/mais brilho		Normalmente mais pobre/mais vítreo	
Empeno	Normalmente mais baixo		Normalmente mais alto	

Tendo em conta os dados da Tabela 3.1, o PA66-GF30 é o material que tem o módulo de Young mais alto, o que o torna num bom candidato para a peça de interesse. O facto de este ter um módulo de Young superior, significa que tem mais rigidez quando comparado com os restantes. O módulo de Young representa as características de deformação do material. Se este valor for suficientemente alto, o material suportará solicitações de maior carga com menos deformação, em comparação com os restantes. Também, a rigidez é a resistência do

material contra a pressão aplicada sobre ele, então a rigidez e o módulo de Young são propriedades inter-relacionadas de qualquer material [69].

3.3. Softwares

3.3.1. Siemens NX®

Inicialmente foi desenhado um modelo em 3D de uma peça de interesse, que serviu de base à análise numérica. Para o *design* do modelo, recorreu-se ao Siemens NX®, disponível na Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Este é um *software* CAD bastante poderoso e completo, que tem uma vasta gama de aplicação. Entre outros fatores, a sua precisão é uma das principais características que torna este *software* muito procurado para áreas como por exemplo, a engenharia aeroespacial.

3.3.2. Moldex3D®

Para simular o processo de injeção foi utilizado o Moldex3D® R17, com o módulo FIM (*Foam Injection Molding*), que permitiu simular o processo Mucell®, fornecido pela Simulflow, Lda. Este tem uma interface gráfica bastante intuitiva, que permite operar com grande facilidade. É um dos *softwares* de simulação mais utilizados na Europa na otimização de processos de moldagem de peças termoplásticas e também se destaca pela elevada precisão nos resultados.

Para além disso, o Moldex3D® R17 dispõe de uma interface FEA, que permite exportar dados de uma simulação da injeção de um componente reforçado por fibras. A exportação dos resultados pode ser feita diretamente para um programa de análise estrutural, ou para um programa de interface micromecânica como o Digimat®, através do módulo “*Micromechanics interface*”. Existe também a opção de escolha do programa de análise estrutural a utilizar, o tipo de elemento e também o tipo de malha que se pretende associar à informação a exportar. Na Figura 3.4 é apresentada uma ilustração da interface FEA do Moldex3D®.

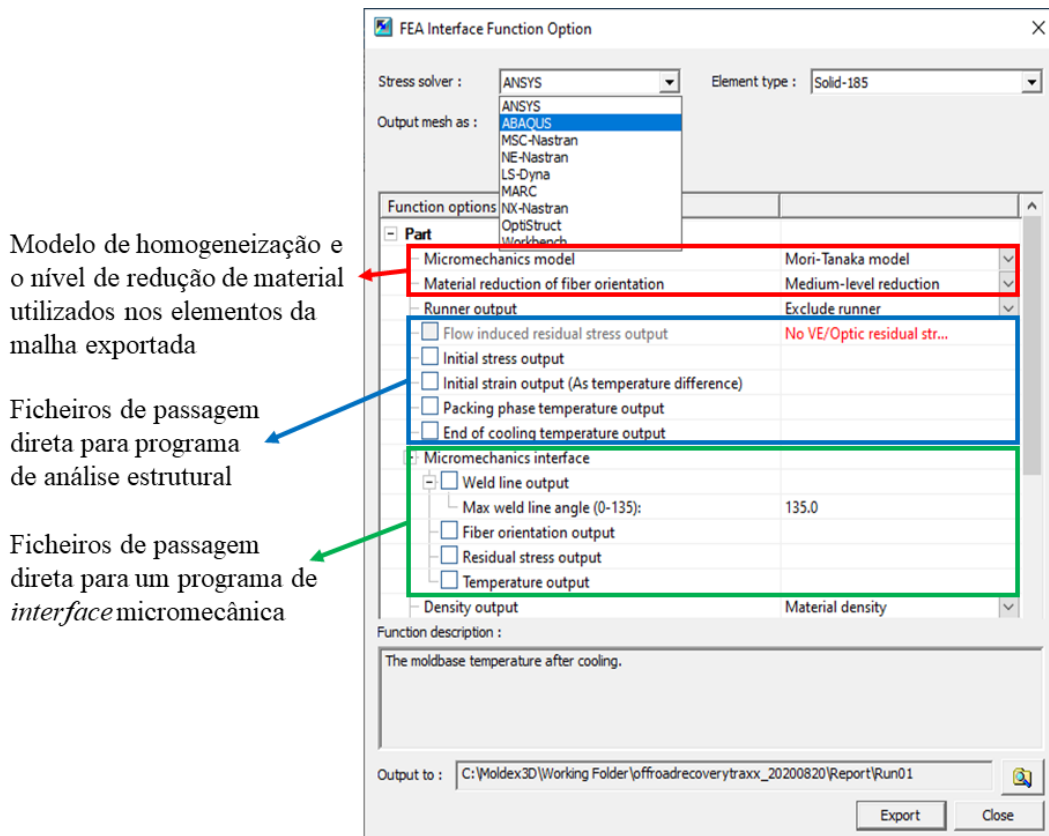


Figura 3.4 - Interface FEA do Moldex3D® [70].

Antes da exportação de resultados, é possível alterar o modelo de homogeneização para as propriedades do compósito e o nível de redução para a criação dos materiais associados aos elementos. Os modelos micromecânicos disponíveis no Moldex3D®, responsáveis pelo processo de homogeneização, são o modelo Mori-Tanaka, o modelo Halpin-Tsai e o modelo tradicional de compósitos, havendo seis níveis possíveis de redução de material, que vão desde o nível máximo, alto, médio, baixo, mínimo e até nenhuma redução. Estas duas opções, influenciam as propriedades dos elementos do ficheiro com a informação da malha que é exportado [71].

Durante a exportação da malha de injeção, o Moldex3D® procede à criação de materiais com diferentes propriedades para cada elemento, ou grupo de elementos, dependendo do modelo de homogeneização e do nível de redução de material pretendido. Caso se opte por nenhuma redução no detalhe da informação material, o ficheiro da malha exportada vem com um material criado para cada elemento. Por outro lado, caso se opte por uma redução no detalhe na definição material, como forma de reduzir o tempo computacional, o número de materiais criados é menor, tendo em conta um critério associado à orientação obtida nas fibras durante

a simulação do processo. Assim, poderão existir vários elementos com as mesmas propriedades. Também é possível aplicar um grau de redução para a densidade do componente, tal como se efetua para as propriedades de cada material criado [71].

Neste caso de estudo, pretende-se obter as informações referentes à distribuição da orientação das fibras e à distribuição do tamanho da célula e densidade celular, resultantes do processo de moldação por injeção convencional e Mucell[®]. Para isso são utilizadas as opções “*Fiber orientation output*” e “*Foaming output*”.

3.3.3. ABAQUS/CAE

Para a simulação numérica de elementos finitos recorreu-se ao *software* ABAQUS/CAE 6.14. Trata-se de um *software* de análise estrutural FEA de carácter geral, que permite simular o comportamento mecânico do componente quando submetido a cargas externas. Este é disponibilizado gratuitamente na versão estudante, diretamente do site da *Dassault Systèmes*[®] [72]. O ABAQUS/CAE tem uma interface gráfica intuitiva, contém uma grande variedade de bibliotecas de elementos de materiais, assim como diversos tipos de condições fronteira, características únicas que podem atender às necessidades da engenharia complexa. Este tem sido amplamente utilizado em universidades e na indústria automóvel. Também este foi disponibilizado na versão estudante.

3.3.4. Digimat[®]

Os *softwares* de análise estrutural FEA, têm como finalidade simular o comportamento linear elástico de materiais com propriedades isotrópicas, no entanto, não consideram a orientação das fibras para compósitos poliméricos reforçados com fibras, num caso de importação direta de uma malha de injeção.

Uma solução para colmatar esta limitação, pode ser a combinação dos resultados dos diferentes módulos do Digimat[®] R2019.0, para criar um modelo completo que considera a anisotropia do material, a orientação da fibra e a distribuição e intensidade microcelular de materiais porosos [73]. O Digimat[®] efetua determinadas aproximações que possibilitam generalizar a teoria de um regime linear elástico para um regime não-linear.

O Digimat[®] é uma *suite* de *software* que se baseia na tecnologia da modelação de materiais e pode ser utilizado por engenheiros de materiais e especialistas em processos de fabrico,

para prever com precisão o comportamento micromecânico e não-linear de materiais compósitos e estruturais [73]. Dependendo do objetivo do utilizador, a interface do Digimat[®] (Figura 3.5) apresenta um conjunto de módulos direcionados para a engenharia dos materiais (Digimat-MF e Digimat-FE) e para a engenharia estrutural (Digimat-MX, Digimat-MAP e Digimat-CAE). Para além disso, este contém também outras ferramentas como o Digimat-RP, Digimat-HC e Digimat-VA, que dispendo de interfaces gráficas de fácil uso, tornam mais simples a sequência de tarefas envolvidas para a obtenção de soluções de determinados problemas de engenharia.

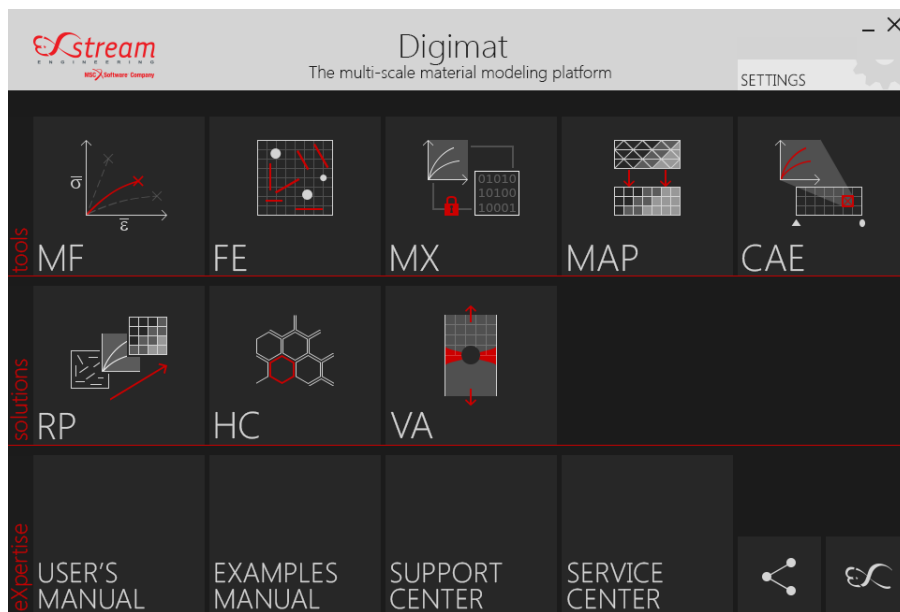


Figura 3.5 - Interface gráfica do Digimat[®] [74].

Nesta dissertação, apenas serão abordadas as ferramentas utilizadas para cumprir o objetivo proposto, nomeadamente os módulos Digimat-MF, Digimat-MAP e Digimat-CAE.

3.3.5. Digimat-MF

Digimat-MF é o módulo de homogeneização MFH do Digimat[®]. Esta ferramenta é utilizada para modelar modelos de materiais com comportamento linear e não linear. Um exemplo típico, é o caso dos materiais compósitos reforçados com fibra de vidro, utilizados na produção de peças obtidas através do processo de moldação por injeção. Para modelar o comportamento do material compósito, é necessário fornecer ao programa as propriedades dos materiais que fazem parte do compósito final, a geometria, dimensões e fração volumétrica das fibras, modelo de homogeneização e os modelos de materiais.

Posteriormente, são selecionadas leis constitutivas que permitem descrever o comportamento de cada constituinte (fase) e são utilizados modelos micromecânicos de homogeneização, para efetuar a passagem de um nível microscópico para uma análise a nível macroscópico. Este módulo utiliza abordagens semi-analíticas baseadas na solução de *Eshelby* e no problema de inclusão simples, com a finalidade de calcular estimativas aproximadas, mas precisas, das médias volumétricas da tensão e deformação, ambas ao nível do RVE, ou seja, a nível macrométrico [73].

A Figura 3.6 ilustra o funcionamento da ferramenta Digimat-MF.

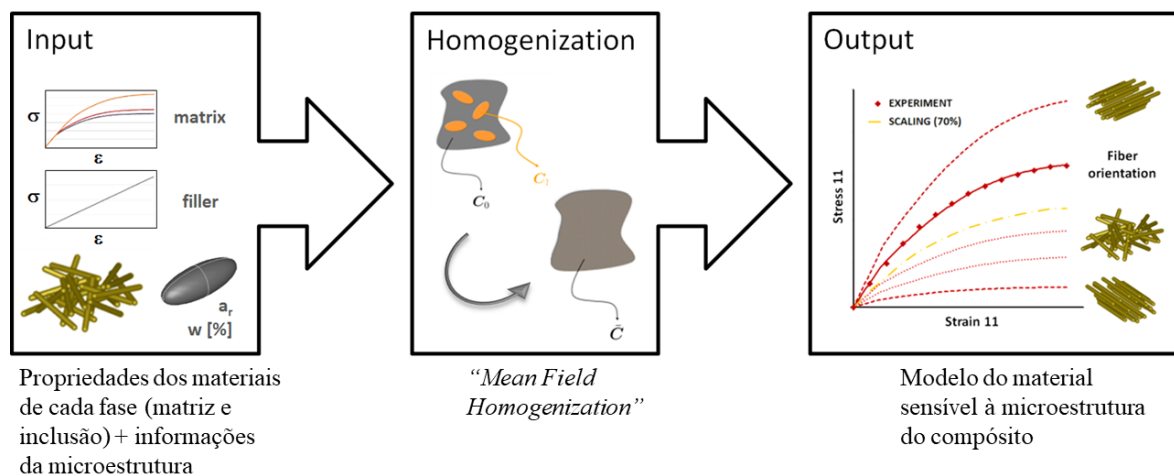


Figura 3.6 - Esquema do funcionamento do módulo Digimat-MF [73].

Um material é considerado elástico quando este recupera a sua forma original, uma vez removidas todas as cargas externas nele aplicadas, ou seja, tem um comportamento "reversível" e não existem tensões residuais. Os comportamentos elásticos podem ser caracterizados por lineares (por exemplo o vidro) e não lineares (por exemplo a borracha) [73].

A maioria dos materiais exibe características não lineares nas relações de tensão/deformação quando se trata de deformações maiores. No Digimat-MF existem várias opções para a criação de modelos de materiais com comportamento não linear, como por exemplo elastoplasticidade, hiperelasticidade, viscoelasticidade, entre outros. Para plásticos reforçados por fibras de vidro, normalmente, a fibra é tida como um material elástico e a matriz elastoplástica, o que representam de forma bastante satisfatória o comportamento mecânico de materiais plásticos [75, 76].

Para este caso de estudo, o modelo de plasticidade da matriz utilizado foi o modelo constitutivo $J2/Von Mises$, com base na literatura [75, 76], por ser o modelo mais simples quando comparando com, por exemplo, o modelo generalizado de *Drucker-Prager*.

3.3.6. Digimat-MAP

O módulo Digimat-MAP é uma ferramenta de mapeamento, que serve para transferir diferentes tipos de propriedades de malha entre as simulações do processo de moldação por injeção e de análise estrutural FEA. Um exemplo de algumas dessas propriedades são a orientação das fibras, tensões residuais, temperaturas, linhas de soldadura, porosidade ou frações volúmicas. Normalmente, a malha utilizada na simulação do processo de moldação por injeção e a malha utilizada na análise estrutural FEA são diferentes. Esta ferramenta permite estabelecer uma ligação entre as duas [73].

De um modo geral, através do Digimat-MAP, uma malha denominada por “malha dadora”, proveniente do CAE de simulação do processo (neste caso o Moldex3D®) é otimizada e dá origem a uma malha estrutural, denominada por “malha recetora”, que vai ser utilizada no programa de análise estrutural FEA (neste caso o ABAQUS/CAE). Para além disso, este permite também visualizar e analisar os erros globais e locais, dos resultados obtidos no mapeamento [73]. A Figura 3.7 ilustra o funcionamento do módulo Digimat-MAP.

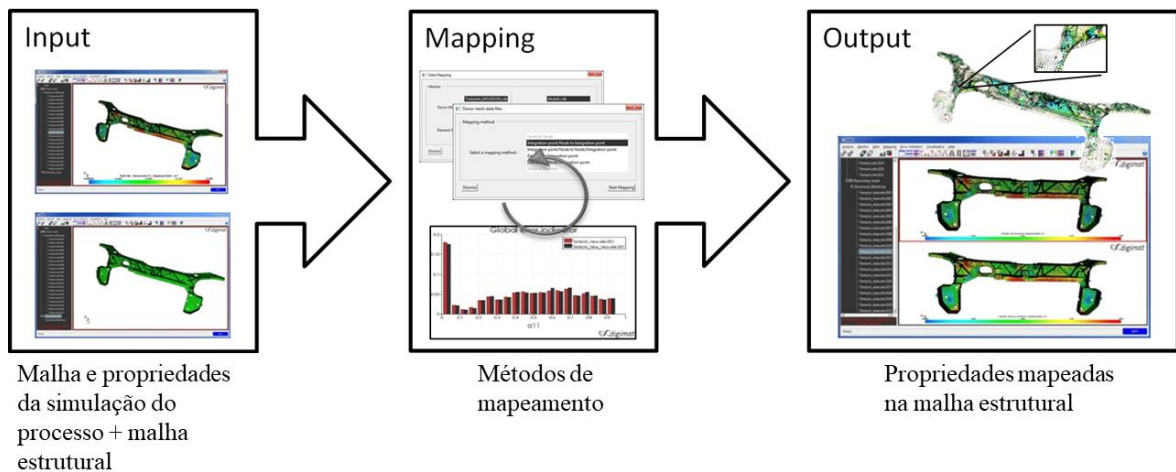


Figura 3.7 - Esquema do funcionamento do módulo Digimat-MAP [73].

Para executar um mapeamento neste módulo, é necessário fornecer ao *software* para além das malhas dadora e recetora, o ficheiro que contém o tensor de orientação das fibras. Posteriormente, é necessário definir algumas condições que influenciam o mapeamento dos

dados, nomeadamente o algoritmo de mapeamento e as tolerâncias. O algoritmo de mapeamento “*Integration point/Node to Integration point*” é o mais direcionado para os dados contidos nos pontos de integração (como as tensões e orientações). De um modo geral, inicialmente, os pontos de integração da malha recetora são localizados na malha dadora e posteriormente a informação é mapeada a partir dos nós da malha dadora para os pontos de integração da malha recetora. Quanto às tolerâncias, durante o processo de mapeamento, o algoritmo de mapeamento procura em que elemento da malha dadora está localizado o ponto/nó de integração da malha recetora. No entanto, os pontos de integração da malha recetora nem sempre estão dentro de apenas um elemento da malha dadora. Para isso, é utilizado o parâmetro tolerância para verificar se o ponto de integração está realmente fora de um elemento ou se tem de ser considerado noutras operações de mapeamento. Por definição padrão do *software*, a tolerância é calculada automaticamente com base no tamanho médio do elemento da malha doadora. Contudo, se as malhas estiverem desalinhadas para além da tolerância calculada pelo Digimat-MAP, este imprime uma mensagem de erro e termina. Sendo esse o caso, o utilizador pode ajustar manualmente a tolerância [73, 77]. A Figura 3.8 abaixo, ilustra como é considerada a tolerância ao redor de cada elemento, enquanto que a Figura 3.9 ilustra a importância da utilização das tolerâncias no mapeamento.

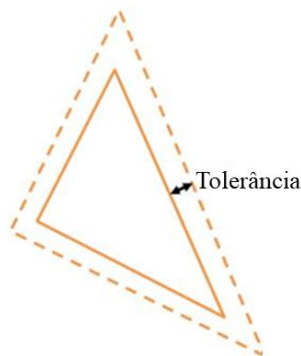


Figura 3.8 - Ilustração da tolerância de mapeamento considerada ao redor de cada elemento [73].

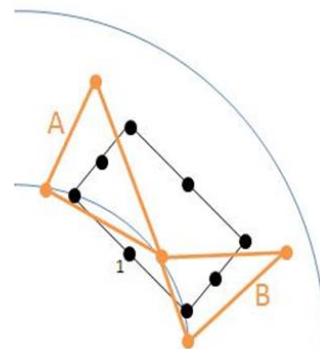


Figura 3.9 - Importância da utilização das tolerâncias no mapeamento [73].

De forma a evitar erros de fusão das malhas, os elementos da malha gerada pelo CAE de simulação do processo, devem ser menores do que os elementos da malha do CAE estrutural. Deste modo, também o tensor de orientação da fibra será devidamente mapeado no modelo [73].

3.3.7. Digimat-CAE

O Digimat-CAE permite estabelecer uma ligação entre *softwares* de simulação do processo e *softwares* de análise de análise estrutural FEA. Este combina num único modelo as informações dos materiais obtidas pela análise Digimat-MF, com uma grande diversidade de tipos de efeitos resultantes do processo de injeção, como por exemplo, orientação da fibra, tensões residuais, porosidade ou até mesmo campos de temperatura, para realizar previsões mais precisas na parte estrutural [73].

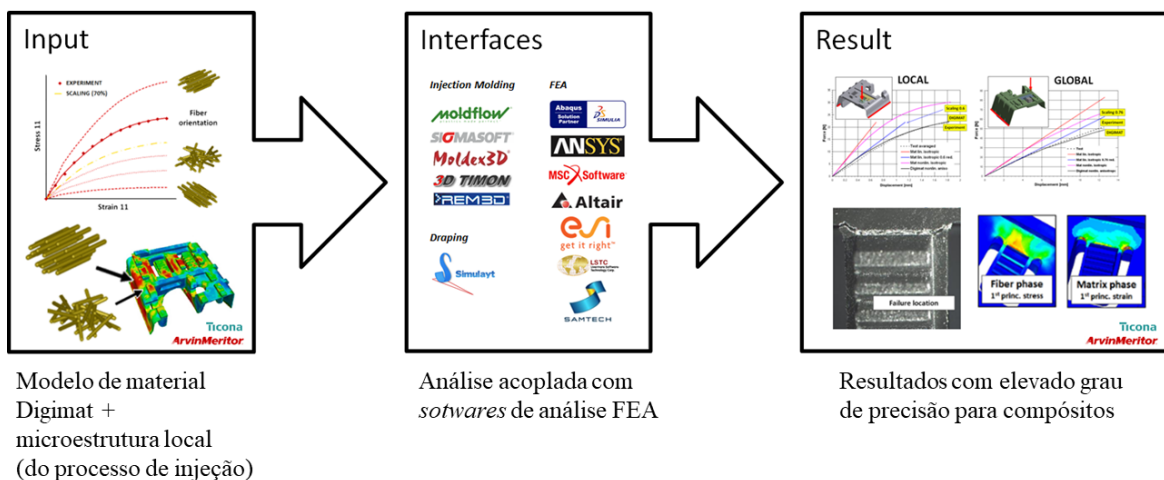


Figura 3.10 - Esquema do funcionamento do Digimat-CAE [73].

Assim sendo, para este caso de estudo foi utilizado o Digimat-CAE com a finalidade de introduzir a influência da orientação das fibras de reforço e a porosidade calculadas pelo Moldex3D®, na análise estrutural FEA executada no ABAQUS/CAE.

3.4. Metodologia de acoplamento de *softwares*

Um dos principais passos que caracterizam este caso de estudo foi a elaboração e aplicação de uma metodologia de combinação e utilização de *softwares*, com o objetivo de simular o comportamento mecânico de uma peça, tendo em conta a influência de dos processos de moldação por injeção convencional e Mucell®, para posterior comparação de resultados. Essa metodologia é representada de forma esquemática no fluxograma ilustrado na Figura 3.11. Este tem o foco principal na informação passada entre *softwares* nomeadamente tipos de ficheiros, em conjunto com as etapas necessárias para a realização das análises.

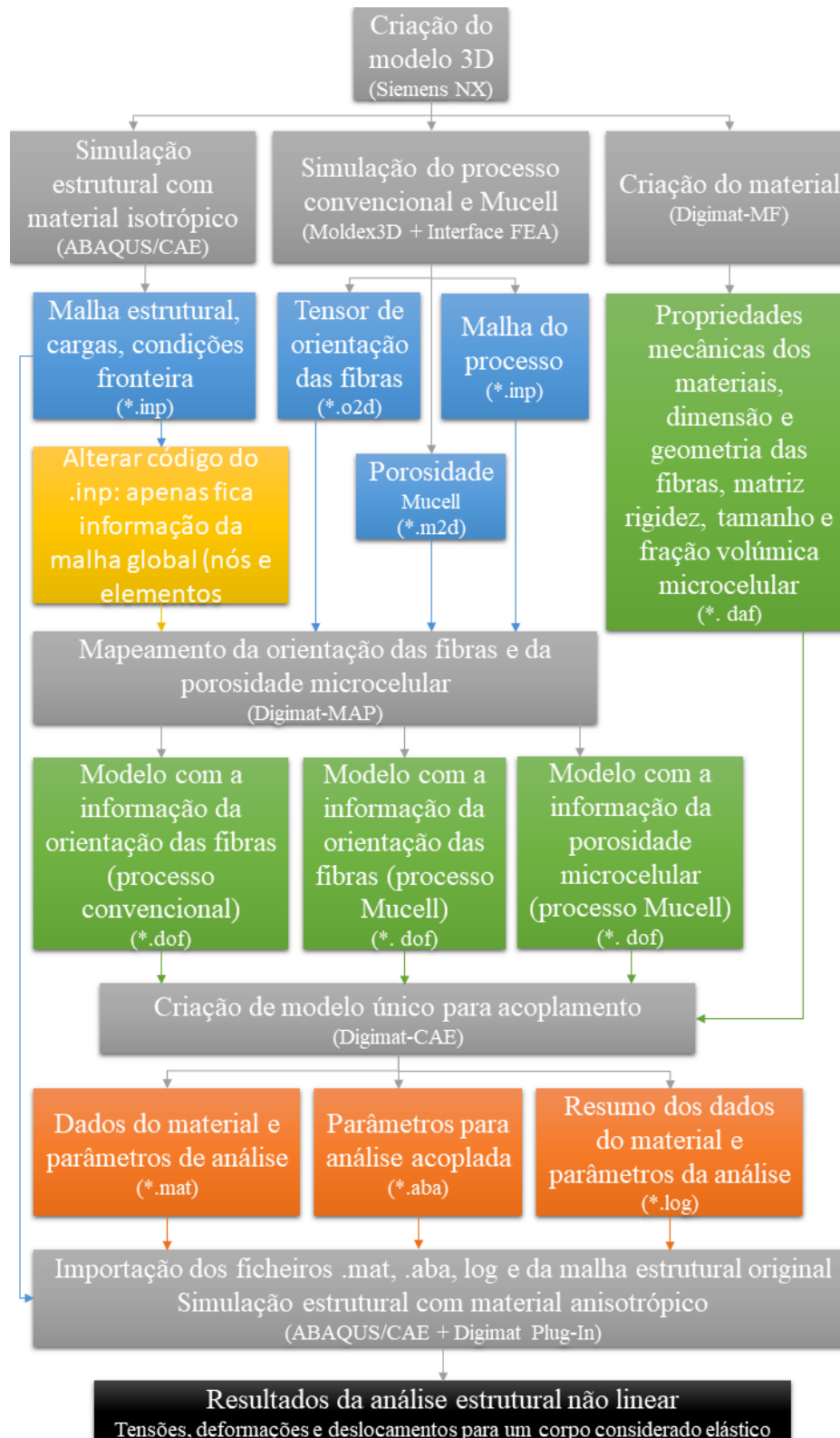


Figura 3.11 - Metodologia de acoplamento de softwares.

De acordo com o fluxograma apresentado, inicialmente é criado um modelo 3D da peça que será objeto de análise técnica, com recurso ao *software* CAD Siemens NX®.

Seguidamente é feita uma análise preliminar estrutural FEA, linear elástica, com um material com propriedades isotrópicas e homogêneas no ABAQUS/CAE. No final da análise é exportado um ficheiro *.inp do ABAQUS/CAE, que contem informações da malha global estrutural, material, condições fronteira, cargas, entre outras. Dado que o Digimat-MAP apenas necessita de informações relacionadas com a malha global estrutural, o restante conjunto de dados tem de ser eliminado do arquivo antes de importá-lo para o Digimat-MAP.

No passo seguinte é utilizado o Moldex3D® para simular os processos de moldação por injeção convencional e Mucell®. No final das simulações, são exportadas as informações relativas ao vetor de orientação da fibra e porosidade microcelular, através da interface FEA do Moldex3D®.

No Digimat-MAP, são efetuadas três análises independentes. Na primeira análise são importados os ficheiros gerados pelo Moldex3D® que contêm a malha do processo de injeção convencional e o respetivo tensor de orientação das fibras. Estes elementos são utilizados como referência para integrar o ficheiro de análise estrutural *.inp modificado previamente. Numa segunda análise, é repetido o mesmo procedimento da primeira análise, no entanto, desta vez, é importada a malha e o respetivo tensor de orientação das fibras referentes ao processo Mucell®. Finalmente, na terceira análise é integrada a malha do processo Mucell® e respetiva informação da porosidade microcelular. Os ficheiros mapeados gerados pelo *software* no final de cada simulação, são exportados e guardados para servirem posteriormente como entrada no Digimat-CAE.

No módulo Digimat-MF, é modelado um material com propriedades anisotrópicas, homogeneizado, utilizando abordagens semi-analíticas de homogeneização *MFH*.

Estando reunidos, a geometria do modelo da peça, os modelos dos processos com a orientação das fibras e a porosidade, um modelo da microestrutura de um material anisotrópico homogêneo, na etapa seguinte são combinadas todas essas informações num único modelo de material, com recurso ao módulo Digimat-CAE.

De seguida é importada a malha estrutural inicial original para o ABAQUS/CAE e após a importação, são integrados no ABAQUS/CAE os ficheiros gerados pelo Digimat-CAE, com auxílio da ferramenta “*plug-in*” do Digimat®.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4. Procedimento experimental

4.1. Criação do modelo 3D

Para a construção do modelo 3D da peça, foi utilizada abordagem *Design for Manufacturing* (DFM). Esta abordagem é o processo clássico de projetar peças, componentes ou produtos, de maneira a ajustar a capacidade de fabricação, para obter um produto final de alta qualidade, a um custo menor e sem alterar a sua funcionalidade [78, 79]. Este método impõe fortes restrições à forma como a peça deve ser fabricada, sendo o número de operações subtrativas um fator chave a ser minimizado (por exemplo, técnicas clássicas como torneamento, furação e fresagem), a fim de reduzir o custo de fabricação, tempo e desperdício de material. A capacidade de fabricação pode ser afetada, entre outros fatores, pelo tipo e a forma da matéria-prima, tolerâncias dimensionais e processos de acabamento. Assim sendo, idealmente, o DFM deve ocorrer logo no início do processo de *design*, antes do início da produção efetiva, onde é feita a simplificação, otimização e refinamento do *design* do produto [78].

Posto isto, no *design* da peça deste caso de estudo, foram aplicados cinco princípios fundamentais da abordagem DFM, para peças obtidas através do processo de moldação por injeção [78]:

- Garantir uma distribuição uniforme da espessura da parede;
- Relação entre a espessura da peça e o comprimento do fluxo;
- Inclusão de raios e chanfros para reduzir zonas de acumulação de tensões;
- Aplicar nervuras para reforçar zonas frágeis da peça;
- Colocar ângulo de saída na peça para facilitar extração desta do molde.

Tendo em conta as boas práticas de *design* de peças, presentes na literatura referenciada [78, 79], uma vez que a peça em questão é geometricamente simétrica, inicialmente optou-se por desenhar apenas um quarto da peça, efetuando depois duas operações “espelho” sobre essa geometria inicial, o que deu origem à geometria final. Isso permitiu diminuir significativamente o número de operações de modelação (ex: extrusão de sólidos, aplicar chanfros e raios de canto, entre outros), o que por sua vez diminuiu consideravelmente, o tempo de *design*. A Figura 4.1 seguinte, ilustra as referidas operações de espelho.

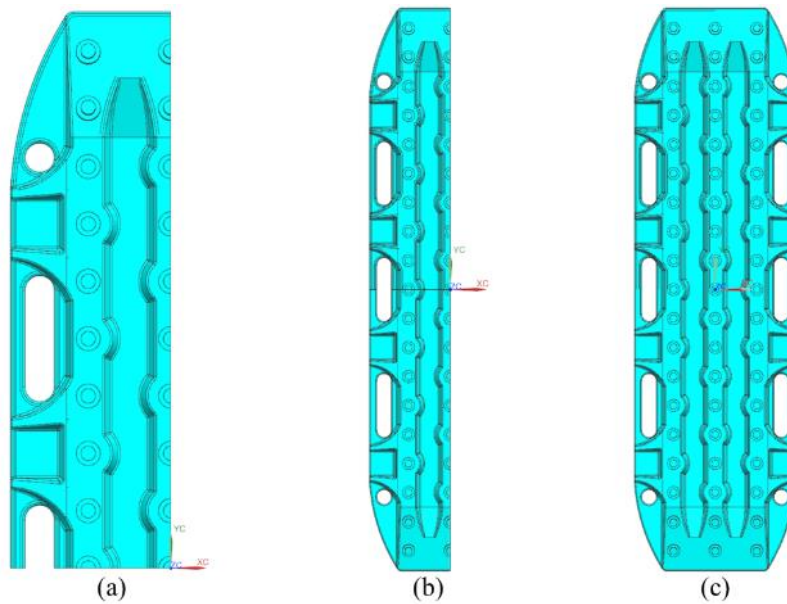


Figura 4.1 - Etapas de design da peça: (a) ilustra um quarto inicial da geometria, (b) ilustra a operação “espelho”, (c) ilustra a segunda operação “espelho” que dá origem à geometria final da peça [64].

Tal como ilustrado na Figura 4.2, a espessura global da parede da peça, com exceção de algumas zonas especiais é de 5 mm. É também importante referenciar que a peça é constituída por furos e tem paredes altas.

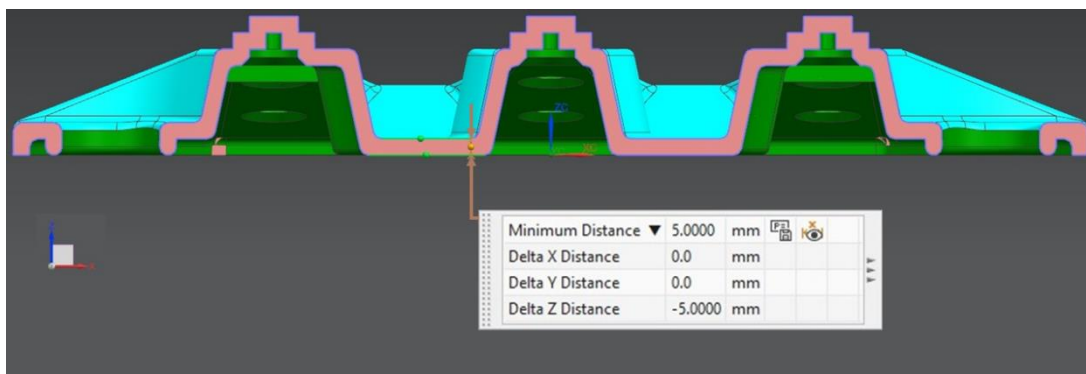


Figura 4.2 - Espessura média da peça de estudo [64].

Uma vez que esta peça tem paredes altas e que à partida, para este caso de estudo, não carece de preocupações estéticas pois a sua função é a de suportar cargas, foi aplicado um ângulo de saída de doze graus nas paredes verticais da peça (Figura 4.3), com a finalidade de evitar que a peça fique presa durante a etapa em que ocorre a sua extração do molde. Normalmente

o valor do ângulo de saída deve ser no mínimo 0.5° , valor que serve de referência na indústria de moldes para injeção de termoplásticos [78].

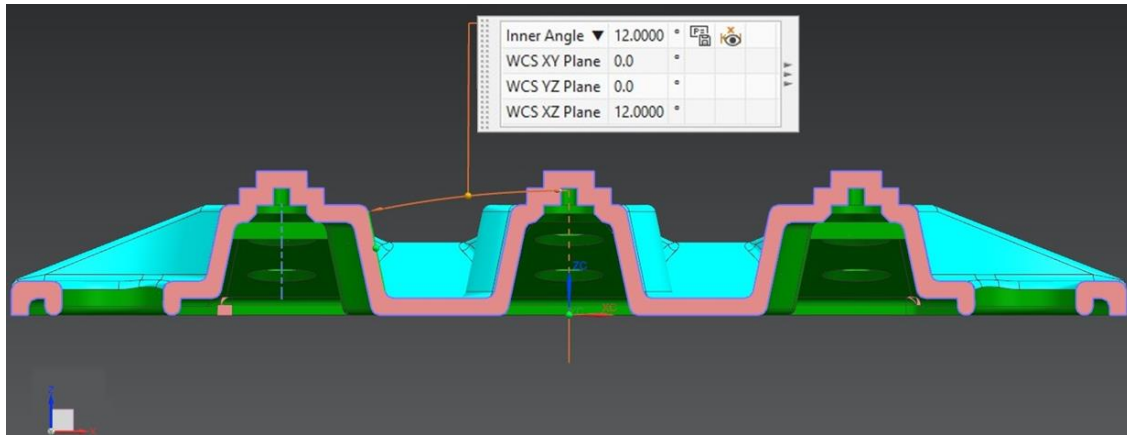
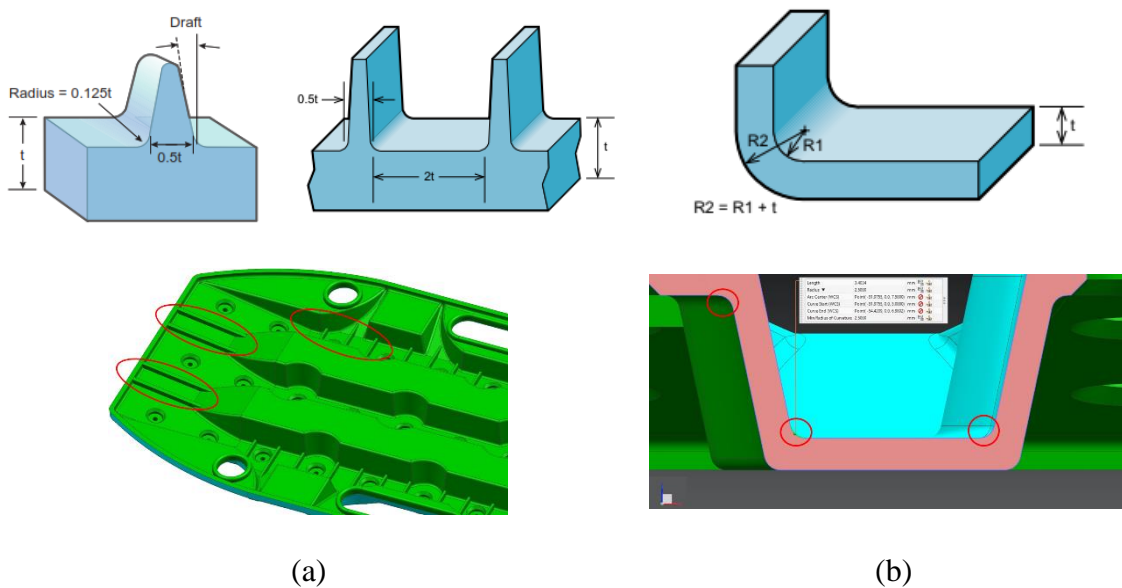


Figura 4.3 - Ângulo de saída da peça de estudo [64].

Também na adição de raios de canto e colocação de *ribs* de reforço (Figura 4.4), foram seguidas as boas práticas aconselhadas na literatura [78].



(a) (b)
Figura 4.4 - (a) adição de *ribs*, (b) adição de raios de canto [64, 78].

4.2. Análise estrutural com material com propriedades isotrópicas

Foi realizada uma análise linear elástica com o *software* ABAQUS/CAE, tendo como base um material com propriedades isotrópicas e homogêneas. Para que neste caso de estudo fosse possível executar uma análise estrutural realista, houve a necessidade de dividir esta etapa em duas fases. Nesta primeira fase foi criado o modelo estrutural com carregamentos, condições de fronteira e malha estrutural, de modo a que seja possível executar o mapeamento dos dados exportados do Moldex3D[®] para esta malha estrutural no Digimat[®]. Numa segunda fase, que será explicada mais à frente, será importado novamente para o ABAQUS/CAE o modelo estrutural criado, mas dessa vez contendo os dados referentes ao tensor de orientação das fibras e tamanho da célula e densidade celular no caso do processo Mucell[®].

4.2.1. Definição do material

Nesta primeira simulação, foi realizada uma análise tendo por base um material com propriedades isotrópicas e homogêneas. As propriedades elásticas (Figura 4.5) foram inseridas com base nos dados do Ultramid[®] A3EG6 (Anexo III). Estas são: Módulo de *Young* de 10000 MPa e coeficiente de *Poisson* de 0.38.

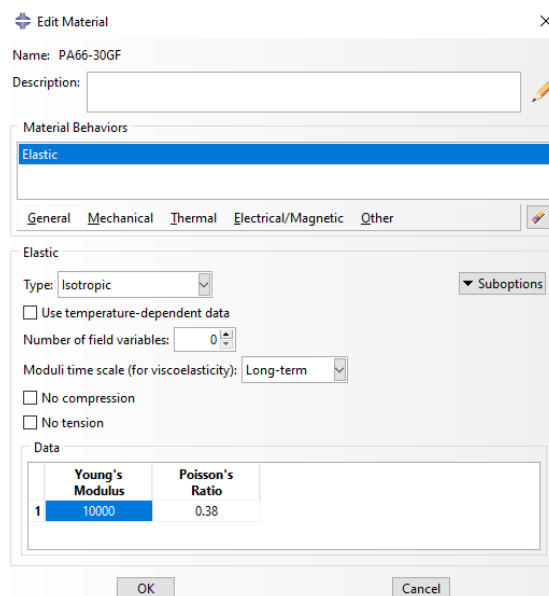


Figura 4.5 - Comportamento do material [80].

4.2.2. Tipo de análise

A Figura 4.6 ilustra como foi definido o tipo de análise a realizar. Isto é feito criando uma etapa com um procedimento de perturbação estática e linear. A natureza da análise será uma análise implícita em que o ABAQUS/CAE irá calcular a matriz de rigidez do modelo para resolver um problema elástico linear.

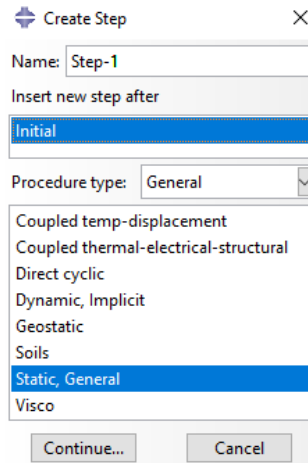


Figura 4.6 - Gestor de etapas do ABAQUS/CAE [80].

4.2.3. Condições fronteira

Na parte inferior da peça foram aplicadas nas extremidades condições fronteira, definidas de forma a simular um encastramento, ou seja, de forma a impedir movimento da peça no eixo dos xx 's, yy 's, zz 's e igualmente de modo a evitar torção. Assim sendo, nestas zonas, foi definida a condição "ENCASTRE" onde $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$, conforme ilustra a Figura 4.7.

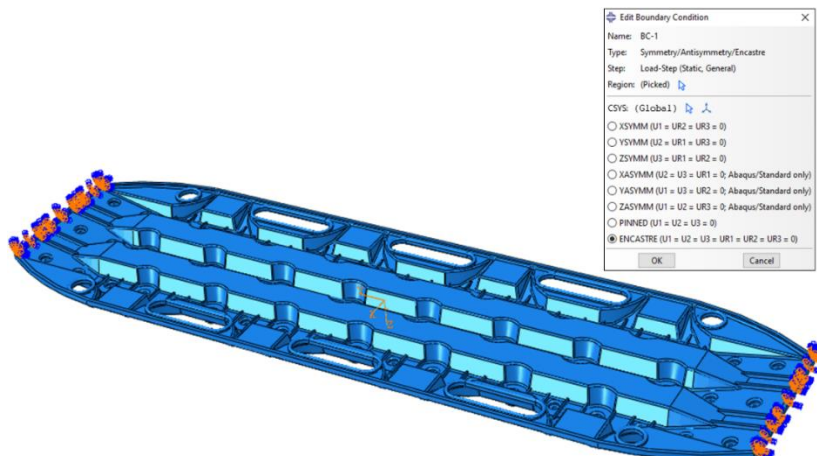


Figura 4.7 - Condições fronteira [80].

4.2.4. Condições de carga

De forma a simular uma solicitação de uma carga transversal, na parte superior da peça foi aplicada uma carga de 1000N (100kg) do tipo concentrada (Figura 4.8).

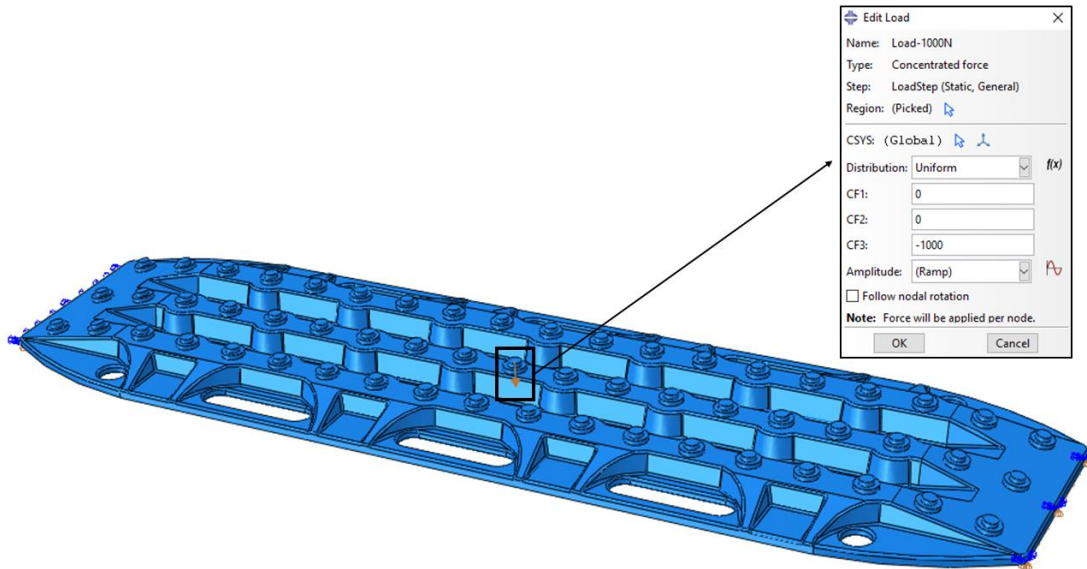


Figura 4.8 - Condições de carga [80].

4.2.5. Definição da malha

O passo seguinte foi definir a malha estrutural. A definição da malha é provavelmente a etapa que requer mais atenção no momento de sua criação. A qualidade da malha afetará significativamente o resultado da análise estrutural FEA. Quanto mais refinada a malha, mais precisos os resultados apresentados, nomeadamente a evolução no campo de deslocamento e principalmente nos campos de tensão. Por outro lado, quanto mais refinada esta for, maior será o tempo de computação necessário. A definição da malha global estrutural consiste na definição do tamanho, tipo de elemento e dos seus parâmetros internos.

Para este caso de estudo, foi definido um tamanho de 12 mm do elemento da malha global. Tendo em conta o tamanho e geometria da peça, esse valor fornece uma malha fina o suficiente para obter bons resultados e sem um esforço computacional adicional, desnecessário. Outro detalhe importante a ter em conta, é que este valor é maior do que o tamanho de elemento utilizado para a malha de injeção do Moldex3D® (10 mm). Assim sendo, o procedimento foi configurado conforme descrito em 3.3.6. O controle de curvatura e o controle de tamanho mínimo foram definidos para valores padrão do ABAQUS/CAE, conforme ilustrado na Figura 4.9.

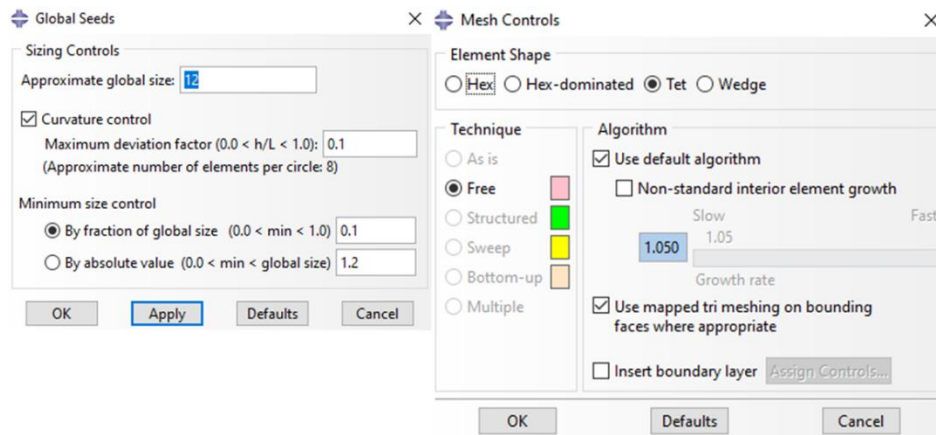


Figura 4.9 - Tamanho do elemento da malha e respetivos parâmetros [80].

Dentro dos parâmetros da malha, foi escolhido da biblioteca de elementos padrão do ABAQUS/CAE, um tipo de elemento com a forma geométrica de um tetraedro quadrático de 10 nós C3D10 (Figura 4.10), pertencente à família de elementos 3D *Stress*. Este é tipo de elemento tetraédrico com 4 pontos de integração e que tem um bom comportamento de uso geral [81]. As funções de forma disponíveis são “*hex*”, “*tet*” ou “*wedge*”. A Figura 4.11 mostra com melhor detalhe as configurações do tipo de elemento. Os controlos da malha mantiveram-se com os valores padrão do ABAQUS/CAE.

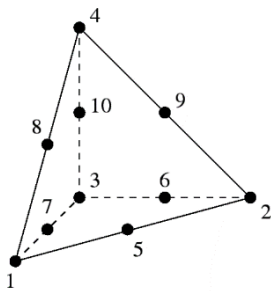


Figura 4.10 - Elemento tetraedro quadrático de 10 nós C3D10 [81].

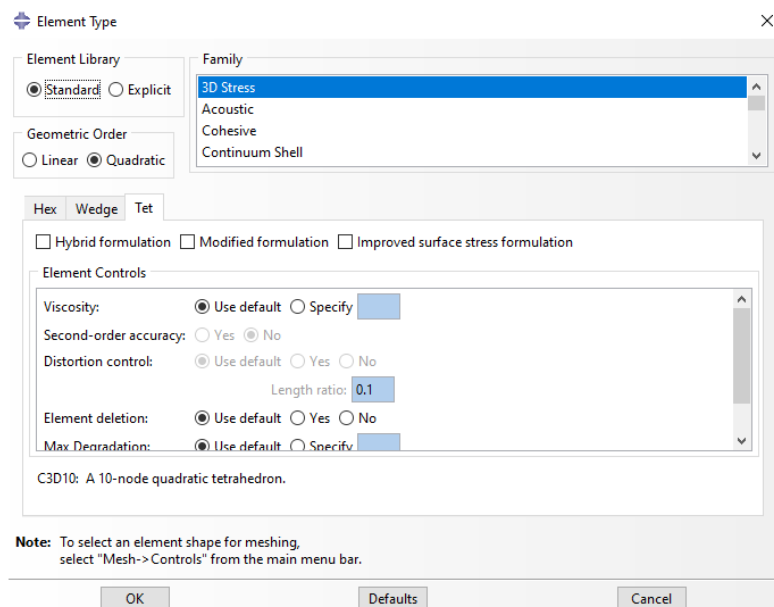


Figura 4.11 - Configurações do tipo de elemento [80].

O resultado da malha global final pode ser observado na Figura 4.12.

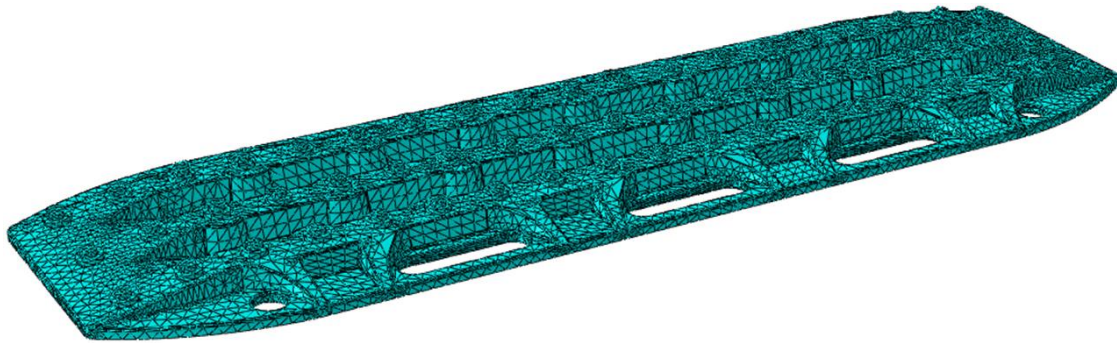


Figura 4.12 - Malha estrutural [80].

4.2.6. Análise estrutural e interpretação de resultados

Após a definição da malha global, o próximo passo foi executar a análise estrutural de elementos finitos ao modelo gerado, considerando um material com propriedades isotrópicas. O resultado da análise do deslocamento é apresentado na Figura 4.13. O deslocamento máximo esperado no centro da peça é de 10.54 mm por 1000N de força aplicada na peça.

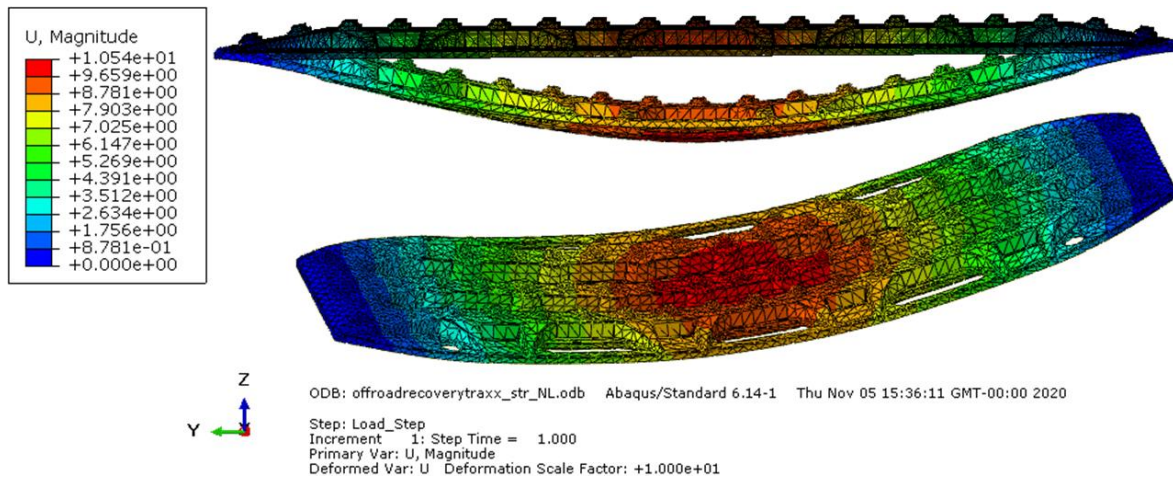


Figura 4.13 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades isotrópicas [80].

Para ilustração dos resultados de uma forma mais evidenciada na Figura 4.13, foram alteradas algumas opções de visualização. Nomeadamente o fator de escala de deformação, que foi definido para 10 vezes o comportamento real, daí a peça parecer exageradamente deformada na imagem.

Seguidamente foi feita uma análise de tensões ao longo da peça, com base nos critérios de *Von Mises*.

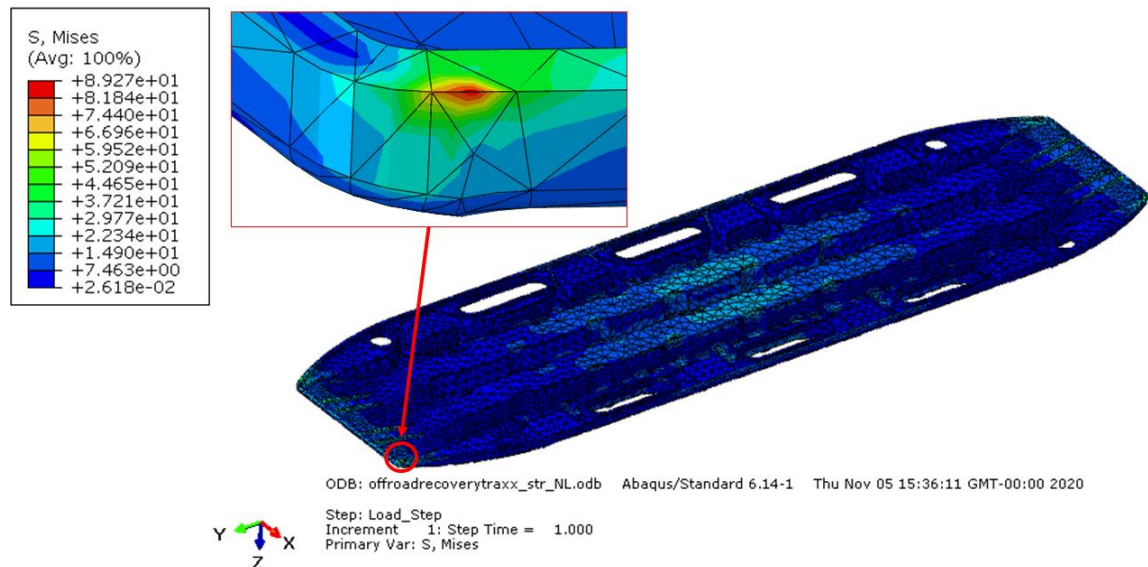


Figura 4.14 - Análise de tensões *Von Mises* [80].

De acordo com a Figura 4.14, é estimado um valor máximo de 441.8 MPa para a tensão residual máxima, que ocorre em zonas da peça que contêm arestas agudas. Estas zonas com arestas agudas nas interseções, causam uma concentração de tensões, que neste caso, sobem até ao valor máximo de 441.8 MPa, para uma força de 1000 N. Neste caso, essa força não causou falha mecânica da peça, mas se a força aumentar linearmente para valores maiores, a peça pode quebrar. Se isso acontecer, essa falha ocorrerá nestas regiões de interseção [78].

Após a definição do modelo foi realizada a escrita do ficheiro **.inp*, contendo as informações da geometria da peça, propriedades do material, carga, condições fronteira, a definição do problema a ser executado, o tipo de elemento e a configuração da malha. Este ficheiro será posteriormente foi dado como entrada no Digimat-MAP.

4.2.7. Modificação do ficheiro da malha estrutural

O ficheiro **.inp* extraído do ABAQUS/CAE, para além da malha estrutural, gera conjuntos estruturados de informações, que incluem a lista de elementos, nós, propriedades do material, restrições e a definição da etapa. O Digimat-MAP necessita apenas de informações relacionadas com os nós e elementos que constituem a malha. Assim sendo, o conjunto de dados restante deve ser eliminado do ficheiro antes de importá-lo para o Digimat-MAP. Essa

modificação pode ser feita manualmente com recurso a um editor de texto, conforme ilustrado na Figura 4.15.

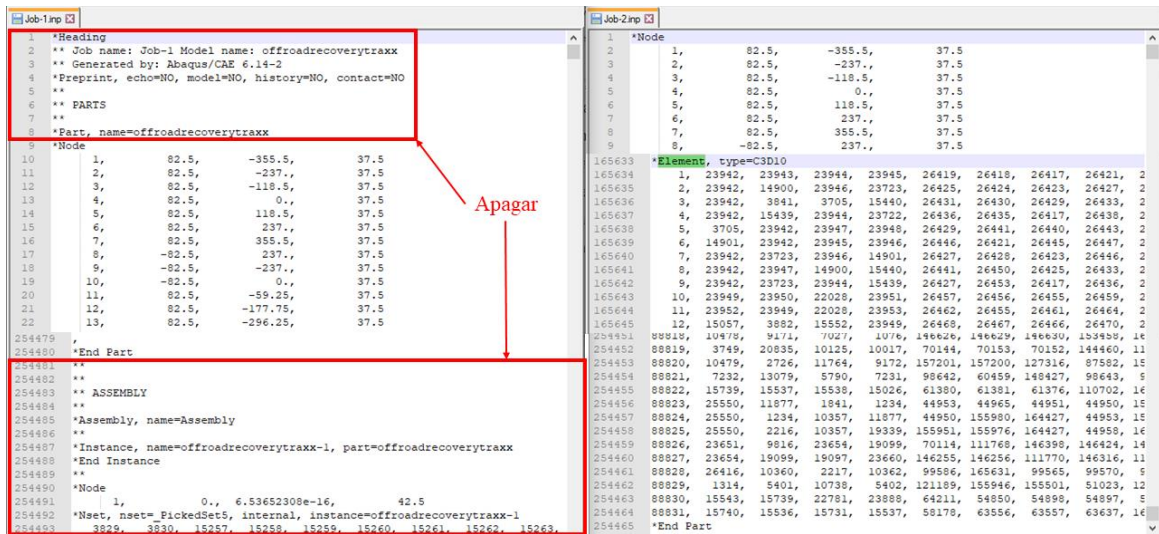


Figura 4.15 - Modificação do ficheiro *.inp do ABAQUS/CAE.

4.3. Simulação do processo

A simulação do processo neste caso de estudo foi efetuada com recurso ao à *suite* Moldex3D R17 Studio®, com a finalidade de obter os tensores de orientação das fibras, no caso da simulação do processo de moldação por injeção convencional e a densidade microcelular para o processo Mucell®, assim como comparar de um modo geral os dois processos.

4.3.1. Sistema de alimentação

Inicialmente foram importadas para o Moldex3D R17 Studio® as informações sobre o modelo 3D da peça a analisar. Uma vez carregado o modelo, o passo seguinte foi definir a posição dos canais de injeção e arrefecimento. A Figura 4.16 ilustra o aspeto geral do referido conjunto.

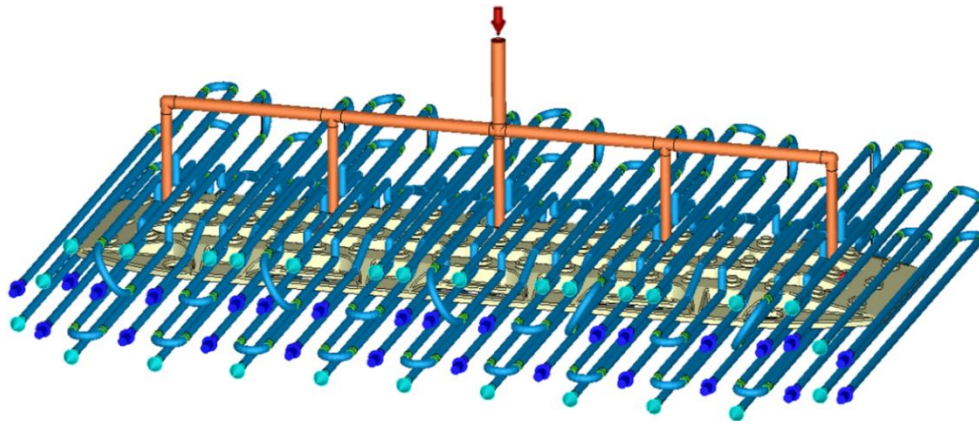


Figura 4.16 - Ilustração da peça do caso de estudo, dos canais de injeção e de refrigeração no Moldex3D® [70].

Todo o sistema de alimentação foi desenhado diretamente no Moldex3D®. Para o *design* do mesmo, optou-se por um sistema de alimentação de canais quentes, com bicos valvulados e de ataque direto à peça, de modo a usufruir da injeção sequencial para tentar obter um enchimento equilibrado e evitar o tanto quanto possível as linhas de soldadura [82, 83].

Uma ilustração do sistema de alimentação é apresentada na Figura 4.17. Este é constituído por uma zona que representa o coletor com um diâmetro de 18 mm, uma zona de entrada do material (*Sprue*) com diâmetro 20 mm, os bicos de geometria tubular com diâmetro interior de 6 mm e exterior de 16 mm. Finalmente os *gates* foram definidos com geometria cónica, com 16 mm de diâmetro na zona junto ao bico e 5 mm na zona de ataque à peça. Os números junto dos *gates* representam uma ideia da sequência da injeção. A sequência foi definida de modo a que o fluxo do material fundido seja no sentido do centro para as zonas mais exteriores da peça. O objetivo é que o enchimento da peça ocorra simultaneamente e por último as zonas mais exteriores da peça. Para tal, o bico central é o primeiro a injetar material, depois os bicos 2, 3, 4 e 5 só abrem quando o fluxo do material fundido passa sob estes. A deteção da passagem do fluxo é feita com recurso a sensores, que na Figura 4.17 são representados pelos pontos a vermelho.

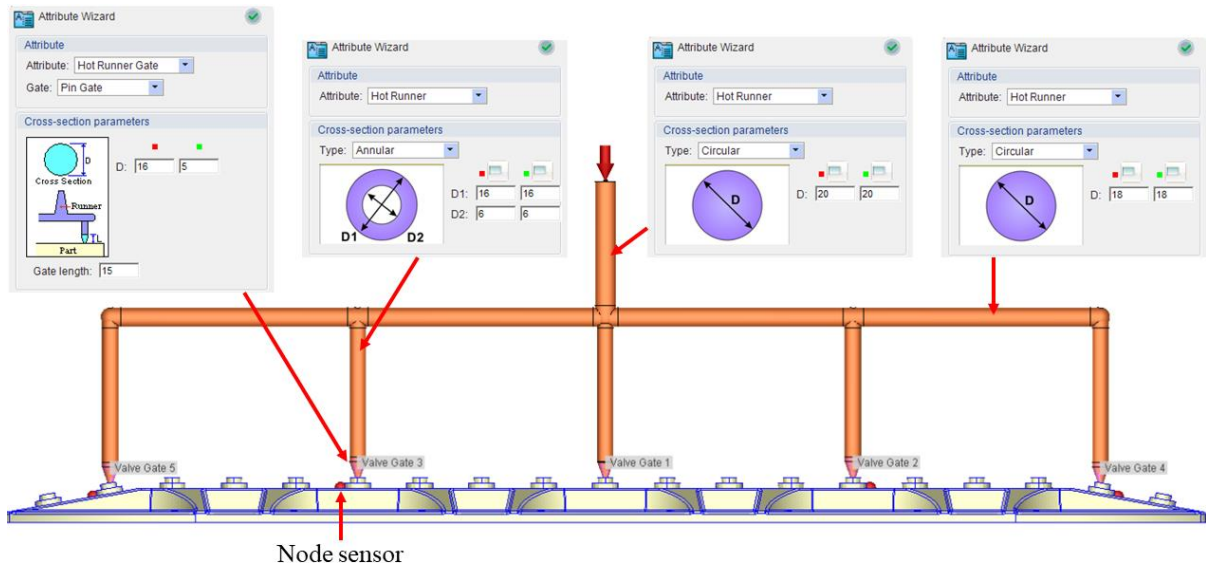


Figura 4.17 - Caracterização do sistema de alimentação [70].

Os dados para o *design* do sistema de injeção foram obtidos com base na literatura [78, 84, 85, 86]. O objetivo foi utilizar dados realistas e com bases sólidas científicas para que fossem obtidos resultados o mais próximo possível de condições reais.

Os fatores que influenciaram a determinação do número de bicos necessários para o enchimento da peça e respectivas dimensões, foram: distância percorrida pelo fluxo de polímero fundido e a massa de polímero que cada bico tem capacidade para injetar, por ciclo.

Para determinar o número de bicos de injeção necessários, foi necessário determinar a distância máxima do fluxo do polímero fundido. Após a obtenção desta recorreu-se aos dados da tabela ilustrada na Figura 4.18, que contém valores recomendados para as distâncias percorridas pelo fluxo de injeção de alguns materiais com base na literatura [85].

Table 8.2 Some collected values for the flow path ratio of injection moulding materials

<i>Polymer</i>	<i>Flow path ratio</i>
ABS	80–150
Acrylic [poly(methyl methacrylate)]	100–150
Nylon 6	140–340
Nylon 66	180–350
Polyacetals	100–250
Poly(butylene terephthalate)	160–200
Polycarbonates	30–70
Polyether ether ketone	up to 200
Polyethylene (HDPE)	150–200
Polyethylene (LDPE)	200–300
Poly(ethylene terephthalate)	up to 350
Poly(phenylene sulphide)	150
Polypropylene	150–350
Polystyrene	150
Polystyrene (toughened)	130
Polysulphones	30–150
Poly(vinyl chloride) (plasticised)	up to 180
Poly(vinyl chloride) (unplasticised)	60
Styrene–acrylonitrile	140

Figura 4.18 - Valores para a proporção da distância de fluxo de alguns materiais utilizados no processo de moldação por injeção [85].

Segundo a Figura 4.18, tendo em conta que a material a injetar é Nylon 66, as distâncias variam entre 180-350 mm. Neste caso escolheu-se um valor médio entre os dois valores, 265 mm, de modo a não considerar nem o valor máximo, nem o valor mínimo. Tendo em conta que a peça tem um comprimento de 1150 mm, dividindo essa distância por 265 mm obtida da equação anterior, obtém-se o valor de aproximadamente 4.34 unidades. Arredondando este número por excesso, obtém-se 5 unidades, que corresponde ao número de bicos de injeção necessários para o enchimento da peça em estudo.

No passo seguinte foram dispostos os cinco bicos de forma equidistante, com cerca de 237 mm de distância entre estes, conforme ilustrado na Figura 4.19.

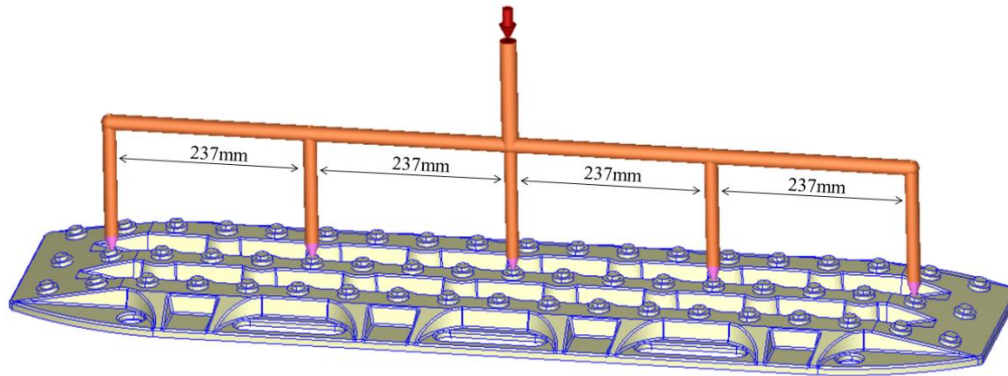


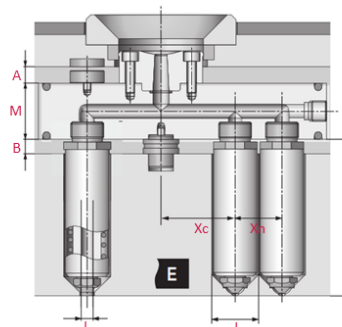
Figura 4.19 - Disposição dos bicos de injeção no Moldex3D® [70].

Para determinar as dimensões dos canais e reforçar a hipótese teórica da quantidade do número de bicos de injeção calculada no passo anterior, recorreu-se a uma tabela de um catálogo fornecido pela Synventive® [84]. A Figura 4.20 ilustra um resumo dessa tabela, apenas com os dados de interesse para este caso de estudo, no entanto, uma versão mais detalhada dessa tabela pode ser consultada no Anexo II.

Nozzle Series	Shot Weight per nozzle (gr)			Dimensions (mm)											
	Valve-Gate			J	L	D	H	Xn (H)	Xn (P)	Xc (H)	Xc (P)	Needle	Optional ø J	Gate Height	
	High ^(a)	Medium ^(b)	Low ^(c)												
06 E01	10	45	80	Ø 6	60...200	Ø 20	Ø 1.2...2	37	57	35,5	45,5	Ø 3	5	< 15	
09 E01	40	80	200	Ø 9	60...400	Ø 27	Ø 1.5...2.5	37	57	40	50	Ø 3.8	-		
12 E01	100	250	500	Ø 12	96...627	Ø 35	Ø 4	57	86	62	76,5	Ø 5	8; 10; 14		
E 16 E01	500	800	1500	Ø 16	96...627	Ø 50	Ø 5	57	86	62	76,5	Ø 6	18	> 15	
16 E02	100	200	400	Ø 16/12	196...647	Ø 50/40	Ø 4	57	86	62	76,5	Ø 6	-		
22 E01	800	1200	2000	Ø 22	96...627	Ø 60	Ø 6	63	86	62	76,5	Ø 8	20; -24		
22 E02	300	800	1500	Ø 22/18	196...647	Ø 60/50	Ø 5	63	86	62	76,5	Ø 8	-		

Viscosity of melt (at medium melt temperature and at a shear rate of 1000 1/s)

- a) high PC, PMMA, PEEK, PES, PSU, PEI, POM
- b) medium ABS, SAN, ASA, PBT, PET, POM (Copo)
PA, PPE, PPO, PPS, PC/ABS, PC/PBT
- c) low PP, PE, PS, LCP, TPE



Xn - minimal distance between nozzles
Xc - minimal distance between nozzle and center support
H - Hydraulic cylinder
P - Pneumatic cylinder

Figura 4.20 - Dados gerais para o design do sistema de alimentação [84].

O primeiro critério de seleção passou por analisar as colunas “High”, “Medium” e “Low” referentes ao “Valve-Gate” (bicos valvulados). Estas colunas dizem respeito à viscosidade do material a injetar, ou seja, se este tem alta, média ou baixa viscosidade. Tendo em conta

que o material a injetar é um PA, segundo a informação da Synventive® [84] este apresenta viscosidade média. O segundo critério foi a massa de material a injetar. Tendo a peça uma massa de aproximadamente 3.2 kg, selecionou-se um bico com capacidade de injetar 800 gr por ciclo e multiplicou-se por 5, o que corresponde a um sistema de alimentação, capaz de injetar cerca de 4 kg de material por ciclo.

4.3.2. Estrutura do molde

Apesar de não ser objetivo deste caso de estudo desenhar um molde para a injeção da peça, de formar a se conseguir obter os resultados pretendidos no Moldex3D®, surgiu a necessidade de desenhar uma estrutura de um molde. Esta foi desenhada também no Moldex3D®, ainda que de uma forma grosseira, de maneira a simular as zonas moldantes à volta da peça. No entanto, note-se que as estruturas devem ser sempre incluídas nas simulações do processo, caso haja interesse no fabrico da peça. Não sendo esse o caso, aqui são descritos apenas os propósitos de simulação e análise, portanto, considerou-se uma estrutura muito básica, onde são simuladas apenas a cavidade e a bucha. A Figura 4.21 ilustra a estrutura de carácter genérico, utilizada nas simulações do processo.

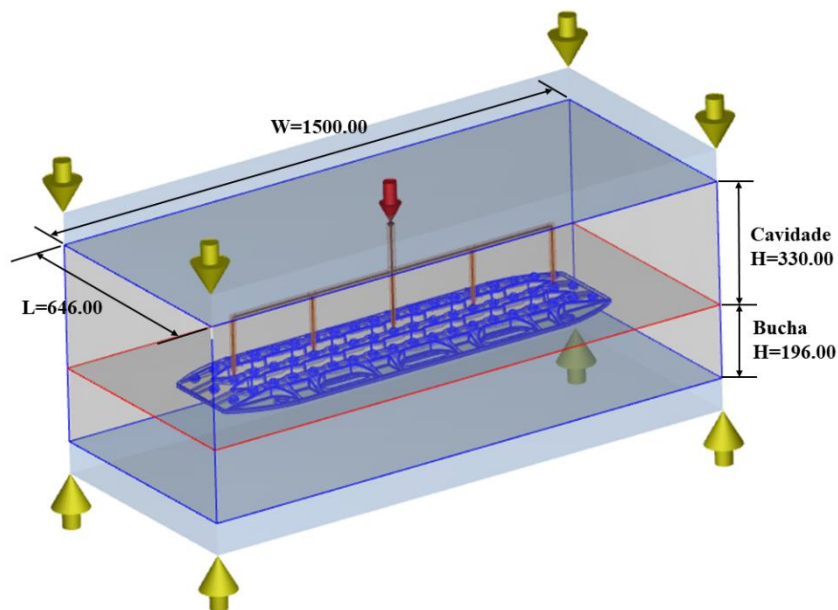


Figura 4.21 - Simulação da estrutura do molde utilizada nas simulações do processo [70].

Para além do *design* da estrutura foi atribuído um material à mesma. Neste caso foi atribuído de forma automática um material genérico da base de dados do Moldex3D®. A Figura 4.22 ilustra as propriedades principais do material das zonas moldantes.

Cooling Channel/Heating Rod		Mold Metal Material	Estimate Cooling Time
Mold metal ID	Material		
Mold Metal [Moldbase material]	P20		
Mold metal ID	Mold Metal [Moldbase material]	-	
Density	7.75	g/cm ³	
Heat Capacity	4.62e+006	erg/g.K	
Thermal conductivity	2.9e+006	erg/sec.cm.K	
Elastic modulus	2.07e+012	dyne/cm ²	
Poisson ratio	0.3	-	
CLTE	1.29e-005	1/K	

Figura 4.22 - Propriedades principais do material das zonas moldantes [70]

4.3.3. Sistema de refrigeração

A Figura 4.23 ilustra o sistema de refrigeração e uma tabela encontrada na literatura [78, 86] que serviu como base para modelar os canais do mesmo. Para além da referida tabela, para o *design* do sistema de refrigeração, seguiu-se também as boas práticas encontradas na mesma literatura [78].

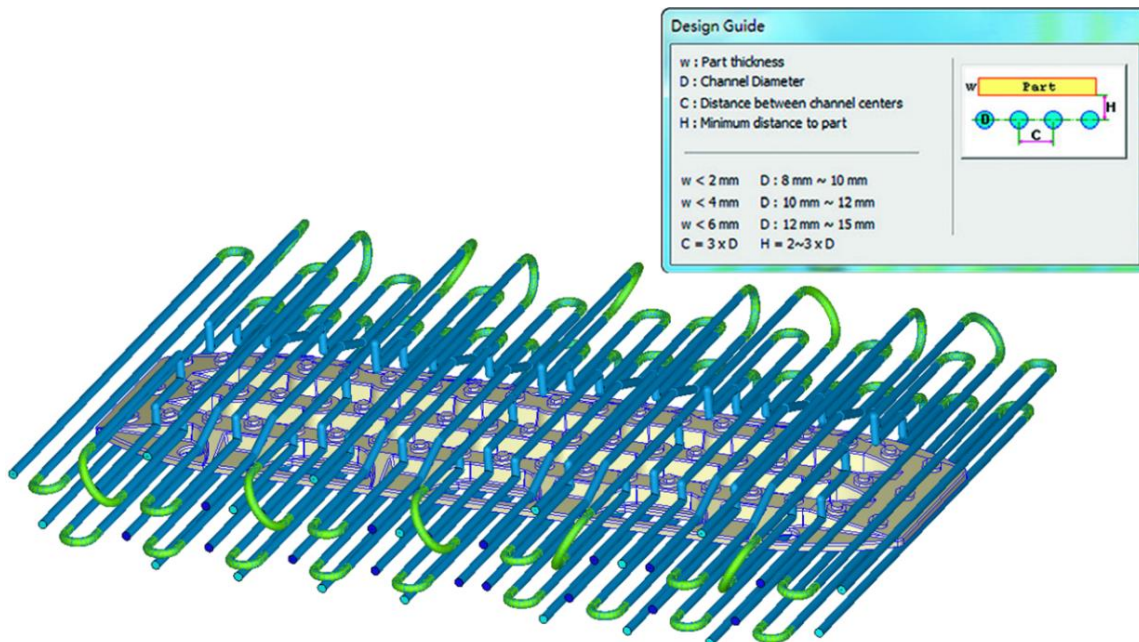


Figura 4.23 - Ilustração do sistema de refrigeração [70].

O sistema de refrigeração apresentado, é constituído por canais de 12 mm de diâmetro e um total de 27 circuitos (11 do lado da cavidade e 16 do lado da bucha). Os canais foram dispostos de maneira que nenhuma zona da peça ficasse sem refrigeração, a uma distância média de 24mm da peça. Este valor é obtido, em função das fórmulas apresentadas na Figura 4.23, onde a distância dos canais “H” para a peça, é dada pelo produto de duas/três vezes o diâmetro dos canais. Neste caso, uma vez que o diâmetro dos canais escolhido foi de 12 mm, de modo a que refrigeração não ficasse muito afastada da peça, optou-se por multiplicar esse valor por dois, o que dá o resultado de 24 mm. O valor do diâmetro dos canais foi escolhido, tendo em conta que se trata de uma peça de grandes dimensões e considerando que não há restrições em termos de capacidade de refrigeração. Outro ponto que importa destacar, foi a colocação de circuitos de refrigeração independentes em volta de cada *valve-gate*, uma vez que são zonas onde normalmente as temperaturas são maiores. Outra das boas práticas encontradas na literatura [78] e implementadas neste caso de estudo, foi a disposição dos canais de refrigeração do lado cavidade e do lado bucha alinhados. Esta prática contribui para uma melhor distribuição térmica no interior do molde, o que ajuda a reduzir os empenos após o processo de injeção [78]. A Figura 4.24 ilustra com maior detalhe estes dois últimos pontos.

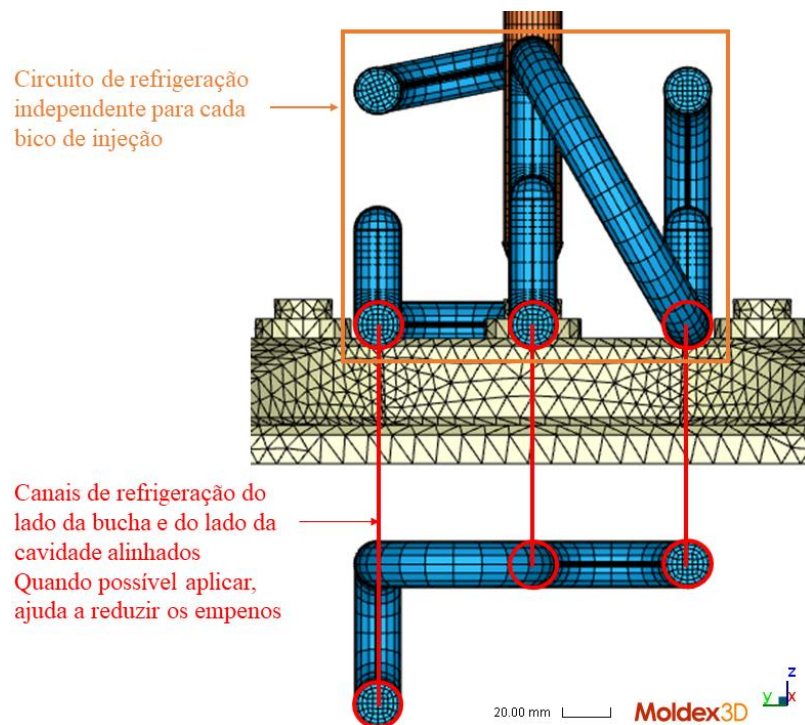


Figura 4.24 - Boas práticas implementadas na disposição dos canais de refrigeração [78].

4.3.4. Cálculo da malha de injeção

Após terem sido introduzidas as informações dos canais de alimentação e arrefecimento, o passo seguinte foi gerar a malha de injeção.

De modo a se conseguir captar da melhor forma os efeitos resultantes do processo, o Moldex3D® oferece a possibilidade de gerar uma malha por camadas *Boundary Layer Mesh* BLM, uma ferramenta de pós-processamento indicada para geometrias complexas. Esta é composta à superfície por elementos prismáticos e no centro por elementos tetraédricos (Figura 4.25). O número de camadas de elementos prismáticos à superfície pode ser definido, entre uma e onze camadas, bem como a espessura total dessas mesmas camadas. A espessura pretendida para as camadas inferior e superior da BLM, pode ser calculada automaticamente pelo Moldex3D®, ou definida manualmente. O valor da espessura é dado pelo cálculo do rácio entre a espessura total das camadas e o comprimento dos elementos (4-1), definido previamente para a determinação do tamanho global da malha [71].

$$BLM \text{ offset ratio} = \frac{\text{Offset distance}}{\text{Mesh Edge Length}} \quad (4-1)$$

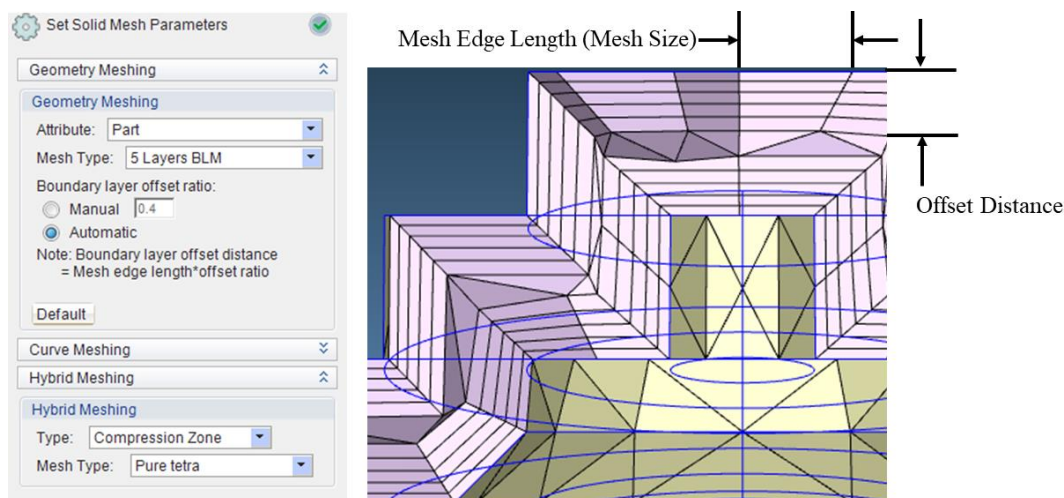


Figura 4.25 - Representação da malha BLM na peça em estudo [70].

Segundo a indicação do Moldex3D®, é indicado utilizar, no máximo, até cinco camadas superficiais BLM para materiais que contenham fibras, com a finalidade de se obter uma maior precisão na previsão da orientação das fibras, bem como para os efeitos do material ao corte, característicos na indução de tensões residuais no componente [87].

A Figura 4.26 ilustra as equações para o calculado do tamanho de elemento e o rácio de *offset* BLM da malha global do Moldex3D®. Tal como esta sugere, para peças com grandes dimensões (>500 mm) cuja geometria não seja muito complexa, de ser utilizado um tamanho do elemento correspondente ao dobro da espessura média do componente e usar um rácio de *offset* de 0.3. Um tamanho de elemento menor, diminui a probabilidade de existirem defeitos na malha global e é mais indicado para peças de geometria complexa, no entanto, quanto menor for o tamanho do elemento, maior será o tempo de computação requerido para as simulações [87]. Em todo o caso, é importante ter em conta que não devem ser desprezados os aspetos que definem a qualidade da malha e ter a noção que esta pode ser refinada em zonas mais críticas, como por exemplo mudanças de geometria, variações de espessura ou transições entre componentes.

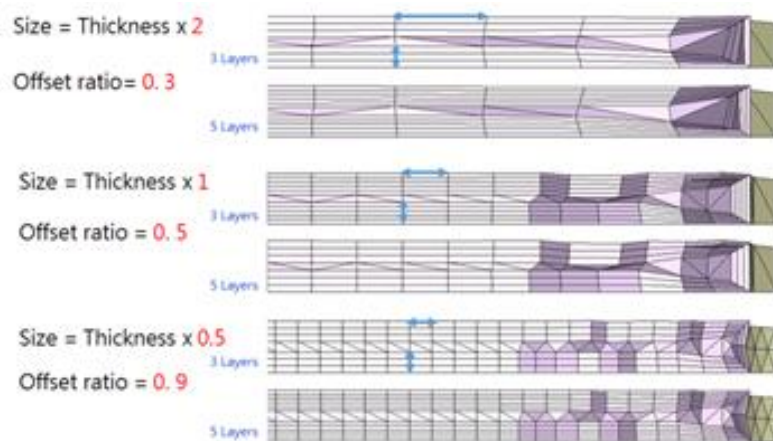


Figura 4.26 - Calculado do tamanho de elemento e o rácio de *offset* BLM [87].

Tendo em conta que a peça deste caso de estudo é de grandes dimensões (>500mm) e que tem uma espessura média de 5mm, o tamanho atribuído ao elemento para a malha global foi de 10 mm, com um rácio de *offset* 0.3. Optou-se por utilizar este valor recomendado [87] com a finalidade de reduzir o tempo de computação necessário para as simulações.

Após algum tempo de calculo, foi gerada a malha global para simulação do processo de injeção. O aspeto geral da malha da peça é apresentado na Figura 4.27 e os dados mais importantes na definição da malha são representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dados da malha utilizada no estudo de enchimento.

Tipo de malha	Contagem
Elementos da malha sólida da cavidade:	803941
Elementos da malha sólida dos canais quentes:	178244
Elementos da malha sólida do molde:	5662944

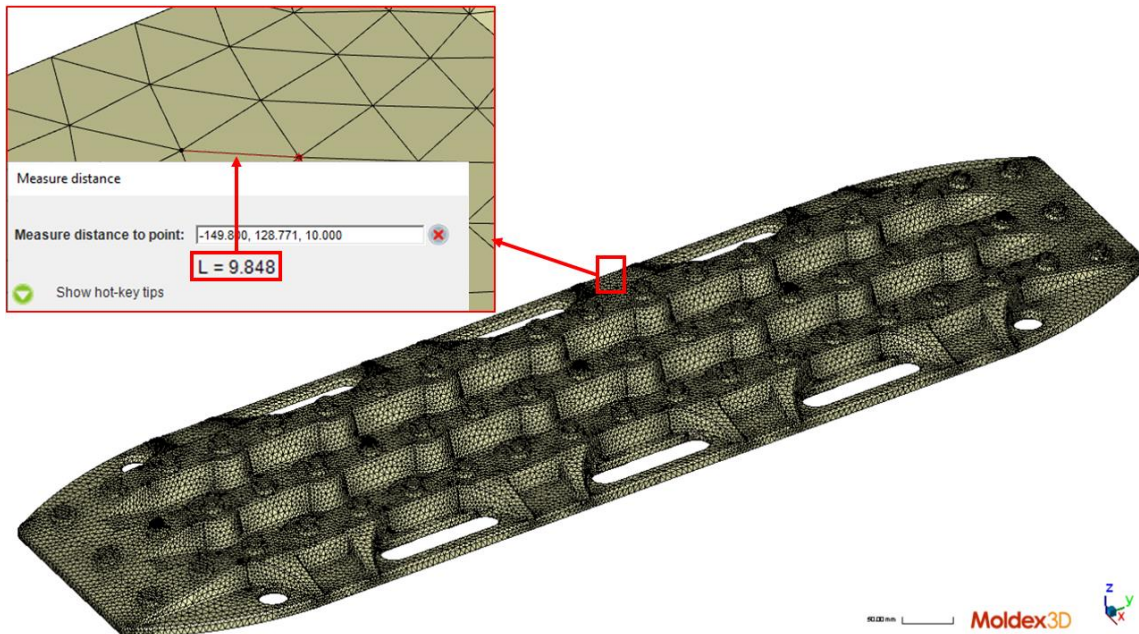


Figura 4.27 - Aspetto geral da malha utilizada para a simulação do processo de injeção [70]

4.3.5. Seleção do material

O Moldex3D® possui uma base de dados com uma grande variedade de materiais e fabricantes. Internamente, esses materiais possuem os parâmetros necessários que o *software* utilizará para realizar a simulação. O material selecionado para as simulações foi o Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30 da BASF®, que corresponde a uma poliamida 66 reforçada com 30% de fibra de vidro. As propriedades deste material são apresentadas na ficha técnica, que pode ser consultada no Anexo III.

Na Figura 4.28 são apresentadas as propriedades mecânicas e as condições de processamento do Ultramid® A3EG6.

Propriedades Mecânicas		Condições de processamento	
Polymer Grade Name Producer	PA66 Ultramid A3EG6 BASF	Polymer	PA66
Mechanical Properties	Fiber-filled polymer - Experimental properties	Grade Name	Ultramid A3EG6
Poisson's ratio v12	0.38 (-)	Producer	BASF
Poisson's ratio v23	0.55 (-)	Comment	30%GF .MVR(275,5)=40 cm3/10min ,D=1.36 g/cm3
Modulus E1 (fiber direction)	1.13e+011 (dyne/cm^2)	Last modified date	-
Modulus E2 (transverse direction)	4.43e+010 (dyne/cm^2)	Moldex3D Bank Version	1017.9
Shear Modulus G12	1.48e+010 (dyne/cm^2)		
CLTE a1 (fiber direction)	3e-005 (1/K)	Process condition	
CLTE a2 (transverse direction)	7.7e-005 (1/K)	Melt temperature (minimum)	280 oC
Fiber Length/Diameter (L/D)	20 (-)	Melt temperature (normal)	290 oC
Interaction coefficient	0.01 (-)	Melt temperature (maximum)	300 oC
Fiber weight percentage	30 (%)	Mold temperature (minimum)	80 oC
		Mold temperature (normal)	85 oC
		Mold temperature (maximum)	90 oC
		Ejection temperature	200 oC
		Freeze temperature	220 oC

(a)

(b)

Figura 4.28 - (a) Propriedades mecânicas, (b) Condições de processamento, para o Ultramid® A3EG6 [70].

4.3.6. Parâmetros do processo

Após a preparação do modelo, do material e da malha, foram definidas as condições gerais de processamento e particulares para os processos de injeção convencional e Mucell®. Os dados gerais relativos à peça, ao material a injetar e ao material das zonas moldantes utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados gerais da simulação do processo.

Material a injetar	PA66 UltramidA3EG6
Volume da peça [mm ³]	2621450
Dimensões da peça [mm]	1150 x 330 x 42,5 mm
Espessura média da peça [mm]	5
Material das zonas moldantes	P20

No que diz respeito aos parâmetros particulares dos processos, foram utilizados os parâmetros mais indicados para o processamento do material selecionado, que correspondem aos valores estipulados na base de dados do Moldex3D®. Com base nesses parâmetros foram realizadas três simulações: uma simulação do processo convencional e duas do processo Mucell®. Na Tabela 4.3 são apresentadas as condições de processamento para cada uma delas.

Tabela 4.3 – Parâmetros dos processos.

Parâmetro	Convencional	Mucell®
Temperatura de injeção [°C]	290	
Temperatura do molde [°C]	85	
Tempo de injeção [s]	5	5
Tempo de compactação [s]	35	5
Volume da peça preenchido no início da formação de espuma [%]	-	95
Concentração inicial de gás [%]	-	5, 10
Tipo de gás	-	N ₂
Temperatura ambiente [°C]	25	
Tempo de refrigeração [s]	40	30
Fluido refrigerante	Água	

Na primeira simulação, foi simulado o processo convencional de moldação por injeção, sem adição de agente expensor. Posteriormente, foram realizadas duas simulações do processo Mucell® com diferentes percentagens em peso de N₂. Tanto as percentagens em peso, como a concentração de gás inicial, foram atribuídas com base na literatura [36, 88], tendo em conta dois fatores:

- a redução de peso pretendida - no caso do volume da peça preenchido no início da formação de espuma;
- a concentração inicial de gás - atribuído tendo em conta o tipo de material a injetar e permite também controlar o tamanho de bolha.

4.3.7. Sequência das etapas da injeção

Foi efetuada uma análise das etapas típicas do ciclo de moldação por injeção para cada um dos processos, com a seguinte ordem: enchimento → compactação → refrigeração transitória → abertura do molde.

Para estudar as variações de temperatura dentro do molde, o módulo de análise de refrigeração do Moldex3D® permite escolher entre dois tipos de análise de refrigeração. Um é o método da temperatura média do ciclo, que considera uma temperatura uniforme durante o ciclo. O outro é o método transitório, que simula as variações de temperatura ao longo do tempo no ciclo [71]. Para este caso de estudo, utilizou-se o método transitório.

Durante o ciclo de moldação por injeção, na fase de enchimento, o material fundido a alta temperatura é injetado na cavidade do molde a alta pressão. Isso faz com que a temperatura do molde aumente. Após a injeção, o material arrefece com ajuda dos canais de refrigeração do molde, até atingir uma temperatura fria o suficiente para que a peça possa ser extraída do molde, no início da fase de abertura do molde. Como resultado, a temperatura no molde diminui. Tal como ilustrado no gráfico da Figura 4.29, as temperaturas do molde aumentam durante as etapas de enchimento e compactação, mas diminuem durante as etapas de refrigeração e abertura do molde. O método de análise de refrigeração transitória pode ser utilizado para analisar essa variação térmica dentro do molde [71, 89].

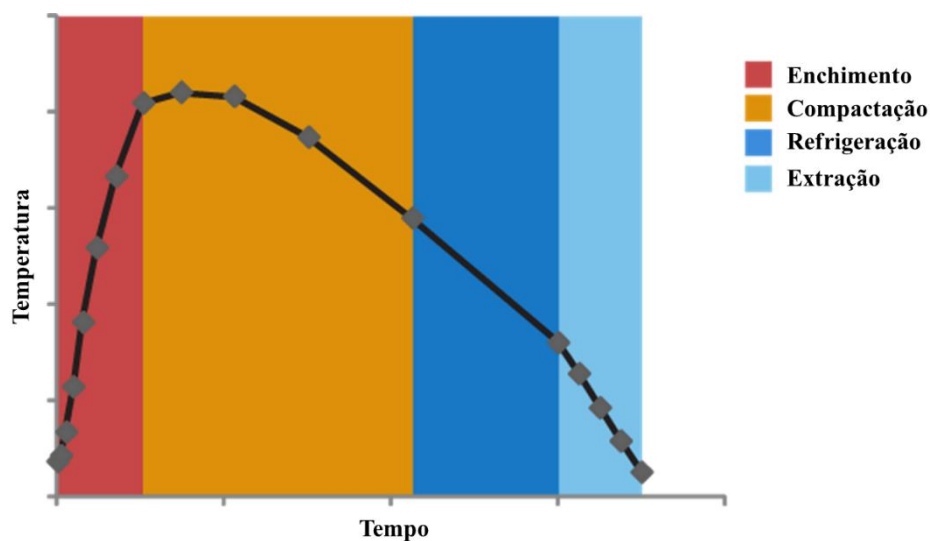


Figura 4.29 - Variação térmica do molde durante um ciclo de moldação por injeção. Adaptado de [89].

4.3.8. Simulação do processo convencional e interpretação de resultados

Depois de definida a sequência das etapas de injeção, foram executadas as simulações no Moldex3D®. Depois de concluídas, muitos resultados interessantes podem ser apreciados.

Na etapa do enchimento da peça é possível analisar o padrão de enchimento da moldação da peça durante o tempo em que ocorre a injeção de material. A Figura 4.30 ilustra a captura de dois momentos da fase do enchimento.

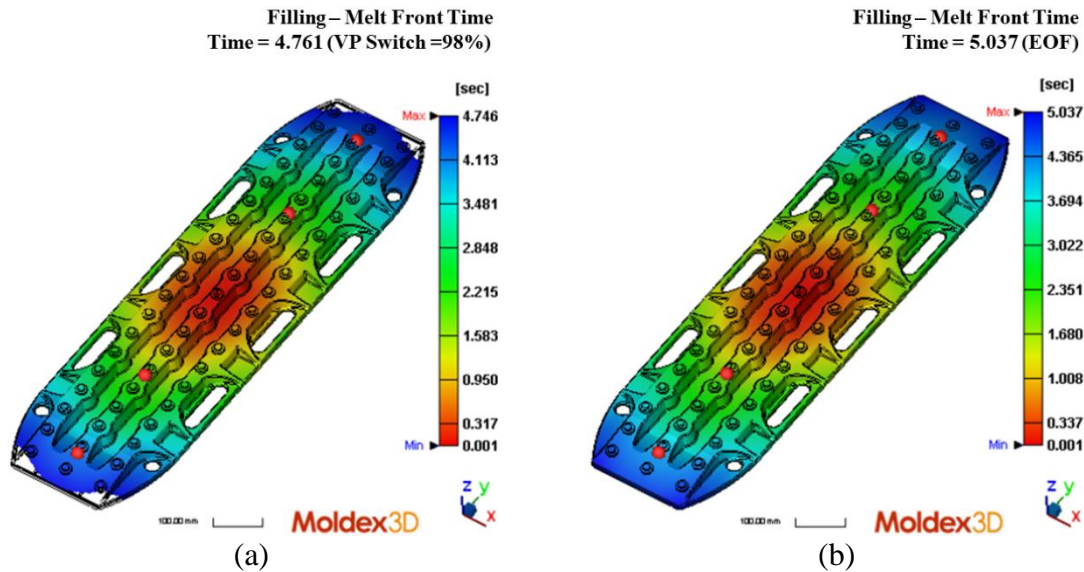


Figura 4.30 - Simulação da etapa de enchimento no processo convencional. (a) *VP Switch* 98% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].

Foi escolhido o momento 98% de enchimento (Figura 4.30a), que corresponde ao ponto de comutação, em que termina a injeção de material e começa a compactação. A Figura 4.30b ilustra o momento final da etapa do enchimento, em que a peça está totalmente preenchida. Neste caso é possível observar que, o tempo de enchimento previsto é ligeiramente superior ao valor que foi inserido inicialmente como *input* para o tempo de enchimento (4.8s).

Outro resultado que se pode visualizar, é o estudo da temperatura da frente do fluxo (*Melt Front Temperature*). Este resultado mostra os valores de temperatura do fluxo do material durante o escoamento. Conforme ilustrado na Figura 4.31, neste caso pode ser observada uma variação de temperatura de cerca de 9°C.

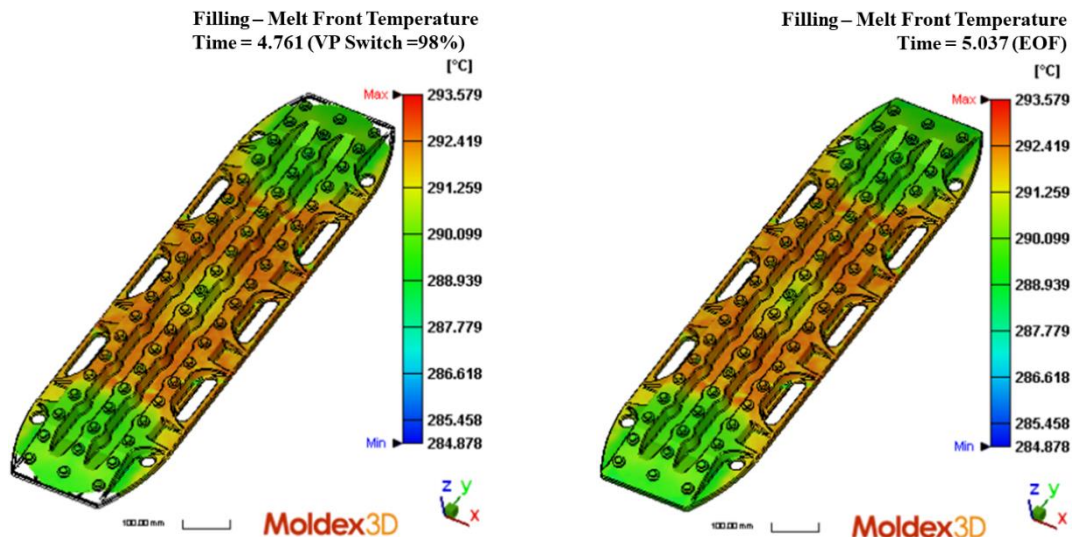


Figura 4.31 - Simulação da temperatura da frente de fluxo. (a) VP Switch 98% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].

Outro resultado interessante a observar, é a presença de linhas de soldadura que aparecem ao longo da peça. Estas surgem quando diferentes frentes do fluxo de material convergem para uma única, criando uma zona visível e que enfraquece a peça. Estas zonas merecem especial atenção, pois a probabilidade de ocorrer falha mecânica da peça é maior nessas áreas. Deve-se também ter em conta que quando estas surgem em arestas vivas, a criticidade dessa zona será ainda maior. Ou se, por outro lado, estas aparecem numa zona estética da peça. O número e a localização das linhas de soldadura podem ser um fator determinante para escolher entre diferentes pontos de injeção. Estes são apenas alguns dos pontos e mostram a importância das linhas de soldadura e que o projetista deve ter em conta para criar uma peça confiável [78].

Neste caso, conforme ilustrado na Figura 4.32, surgiram poucas linhas de soldadura na peça (linhas representadas a vermelho). Isto ocorre devido ao facto de ter sido utilizada a injeção sequencial, tal como previsto inicialmente.

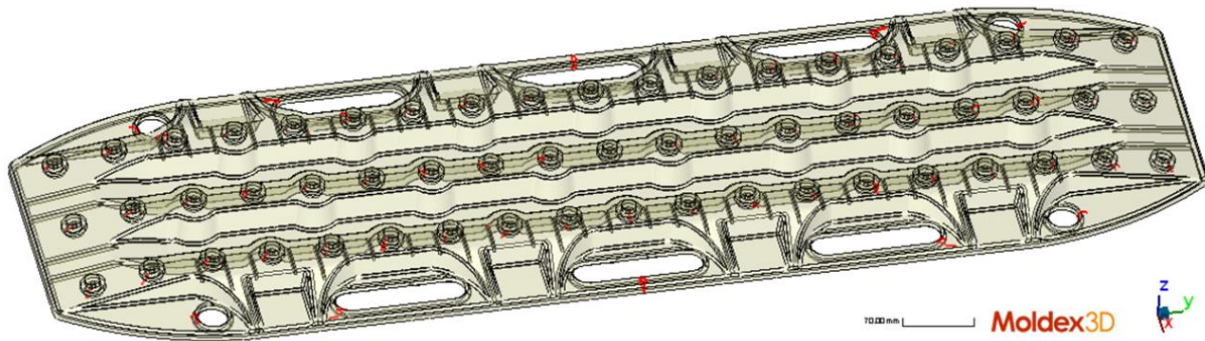


Figura 4.32 - Previsão da localização de linhas de soldadura [70].

É também importante analisar a localização das bolsas de ar na peça. As bolsas de ar, normalmente, surgem quando duas frentes de fluxo convergem em torno de uma ou mais bolhas de ar ou no fim dos trajetos de escoamento de material. Estas podem dar origem a um enchimento e compactação incompletos, podendo estas bolhas provocar danos nas superfícies das peças, ou até aquecer em demasia e causar marcas de queimadura nessas zonas. As soluções possíveis para evitar este problema podem passar, por exemplo, por projetar uma melhor ventilação do molde nessas zonas (por exemplo, adição de posições, extratores, entre outros), para que estas bolhas de ar consigam escapar das cavidades no momento em que ocorre o escoamento do material dentro das cavidades, ou um melhor balanceamento do sistema de alimentação [78].

A Figura 4.33 ilustra a previsão da localização de bolsas de ar na peça no final da etapa de enchimento.

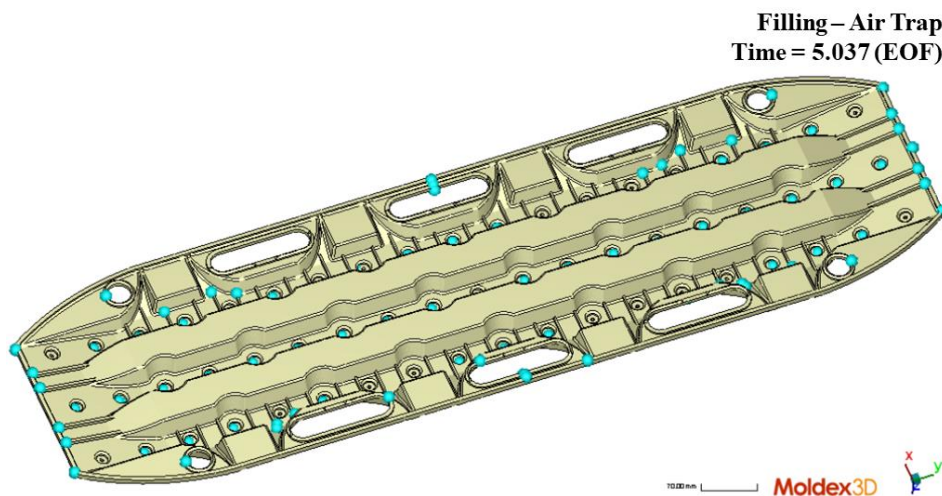


Figura 4.33 - Previsão da localização de bolsas de ar [70].

A Figura 4.34 ilustra a previsão da localização de chupados. Este fenómeno ocorre devido à contração do material. Normalmente, ocorre com maior frequência em zonas com *ribs*, onde a acumulação de material é mais intensa [78], o que neste caso se verificou.

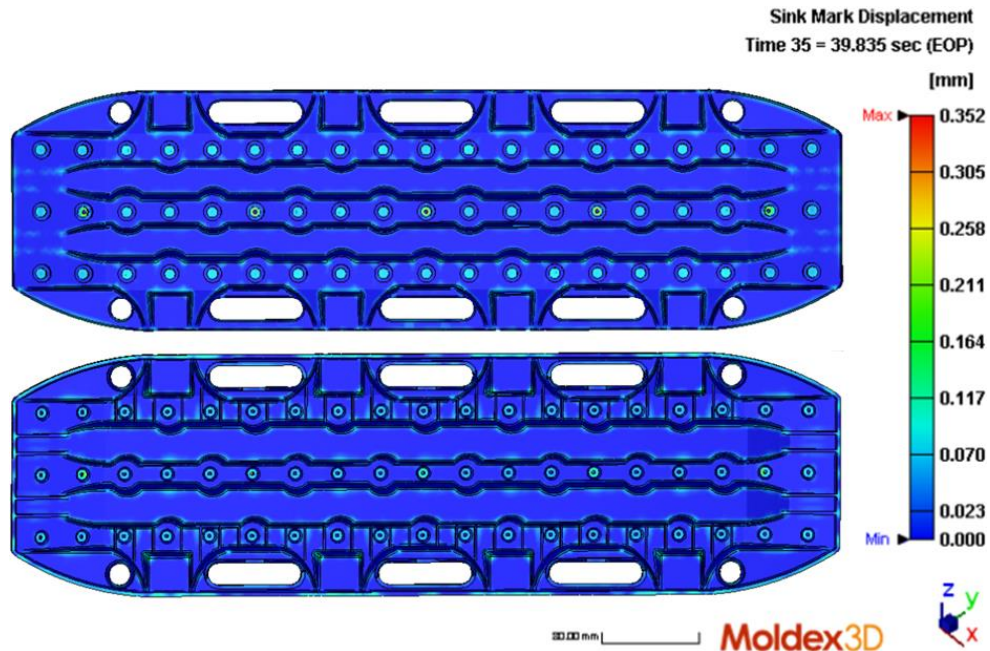


Figura 4.34 - Previsão de chupados [70].

Quando é utilizada a injeção sequencial, é também importante analisar o contributo de cada um dos *valve-gates* para o volume de material injetado, conforme ilustrado na Figura 4.35. Normalmente, é necessária uma contribuição balanceada para se obter resultados otimizados [78].

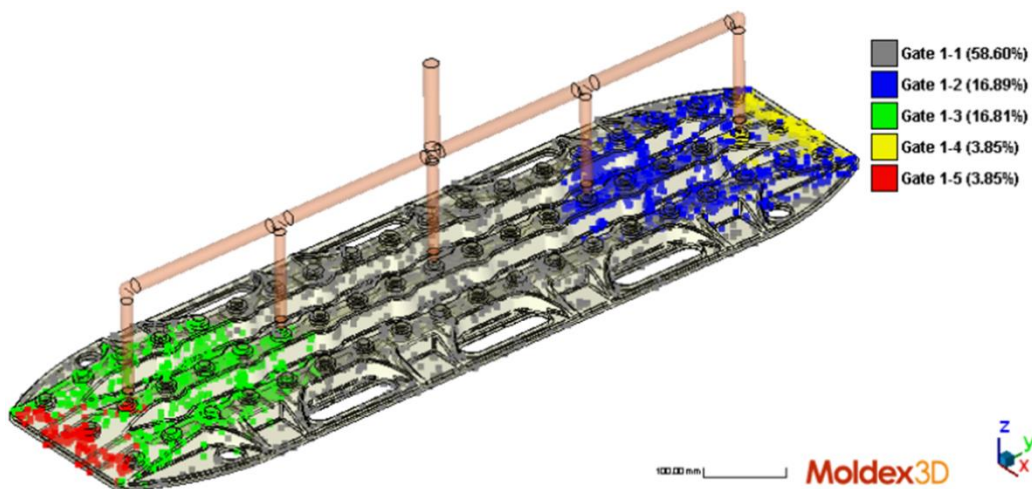


Figura 4.35 - Simulação do contributo de cada um dos *valve-gates* para o enchimento [70].

Neste caso, observou-se que as percentagens de enchimento de material de cada ponto de injeção não têm valores próximos (58.60%, 16.89%, 3.85% e 3.85%) o que leva a concluir que neste caso, os canais de alimentação não foram bem balanceados. Isto acontece porque, tendo em conta o tamanho da peça, e o comprimento do fluxo, foi necessário adicionar dois *valve-gates* no final da peça para garantir que o enchimento da peça ocorria em simultâneo nas duas extremidades, e para garantir também que se conseguiria chegar com pressão de compactação nessas mesmas zonas. Outro fator tem a ver com a necessidade de colocar os *valve-gates* a uma distância equidistante uns dos outros, o que neste caso, não contribuiu para uma injeção equilibrada. Uma solução possível seria, por exemplo, aproximar mais os bicos de injeção e adicionar mais dois nas zonas mais exteriores da peça.

A distribuição de pressão nas cavidades é ilustrada no gráfico da Figura 4.36. Neste é possível observar o comportamento da pressão dentro da cavidade em função do tempo, desde o início até ao final da etapa enchimento. Para além disso também é possível observar o valor máximo da pressão de injeção e que corresponde também ao pico de pressão ilustrado no gráfico, que corresponde a 17.9 MPa. Após este pico de pressão, a mesma cai para 9.6 Mpa como consequência da abertura simultânea dos *valve-gates* 2 e 3. Seguidamente a pressão volta a subir até atingir um segundo pico de 15.3 MPa, momento em que volta a cair, como consequência da abertura dos *valve-gates* 4 e 5. Finalmente esta sobe novamente até estabilizar nos 12.8 MPa, momento que corresponde ao início da etapa da compactação.

Note-se que, é possível observar um perfil em rampa nas subidas da pressão de injeção. Segundo Chen e Gao [90], este perfil de pressão ocorre como resultado de a peça ter uma espessura constante, o que proporciona a uma contração volumétrica mais regular por toda a peça e consequentemente menor empeno nas peças.

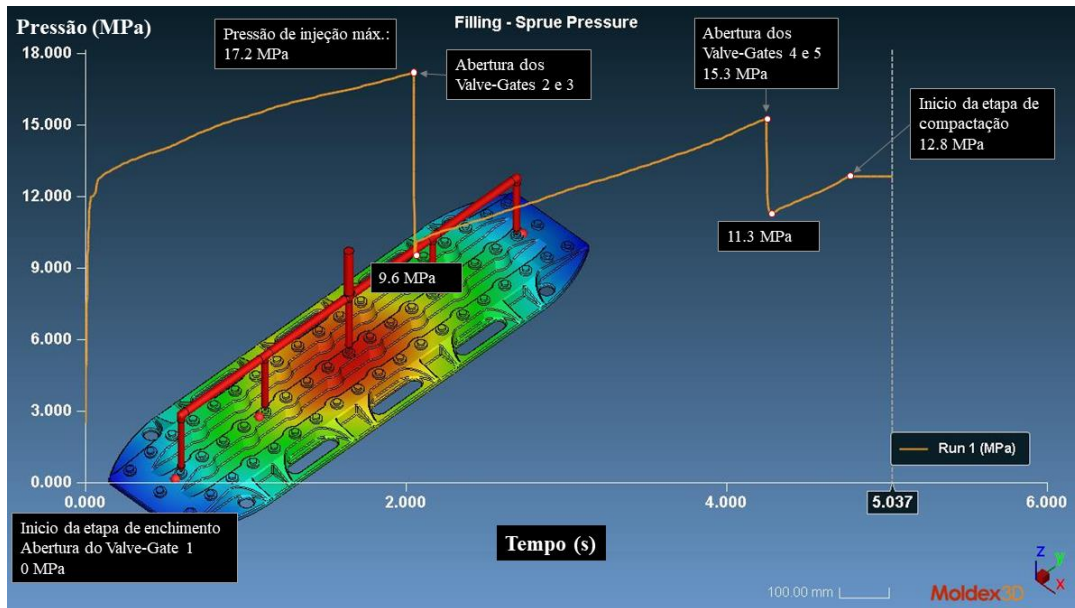


Figura 4.36 - Gráfico da pressão de injeção em função do tempo [70].

Para efetuar as simulações procurou-se respeitar algumas regras definidas, encontradas na literatura. As mais importantes são: os canais não devem provocar uma queda de pressão superior a 50% da pressão total, a pressão de compactação deve ser cerca de 70% da pressão máxima de injeção, a pressão máxima de injeção deve ser inferior a 130 MPa e a variação da temperatura da frente do material não deve ultrapassar os 30°C [78, 83, 91]. Assim sendo, pode-se afirmar que todas estas regras mencionadas foram respeitadas.

O perfil da força de fecho requerida para manter o molde fechado, contrariando a pressão de injeção e compactação, pode ser observado no gráfico da Figura 4.37. O seu valor máximo é de 427.9 Ton. Segundo vários fabricantes de máquinas injetoras a força de fecho não deve passar dos 70% da capacidade da máquina utilizada devido ao risco elevado da ocorrência de rebarbas nas peças [91].

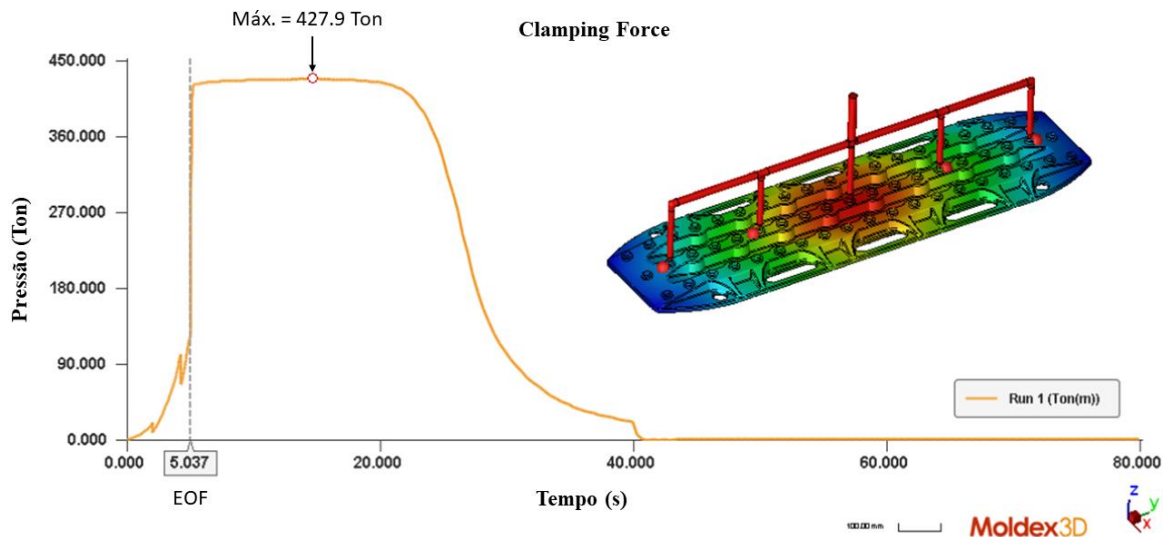


Figura 4.37 - Perfil da força de fecho em função do tempo [70].

Outro resultado importante a observar, é a simulação da estimativa do tempo de arrefecimento da peça. Este considera a temperatura à qual o material se encontra no fim dessa fase, e mostra o tempo estimado desde o final da etapa da compactação do material, até ao instante em que a temperatura do interior da peça está baixa o suficiente para poder ser ejetada do molde. A Figura 4.38 mostra que as superfícies exteriores tanto das peças como dos canais de alimentação atingem a temperatura adequada em poucos segundos, mas quando se aproxima a imagem junto das zonas dos *valve-gates*, é possível observar também que o material junto destes se encontra a uma temperatura mais elevada, o que é normal, tendo em conta que se trata de um sistema de alimentação de bicos quentes. De acordo com os resultados da simulação, estes demoram aproximadamente 30.6 s para serem totalmente arrefecidos, cerca de 10s a menos do que o tempo definido inicialmente (40s) para o arrefecimento da peça.

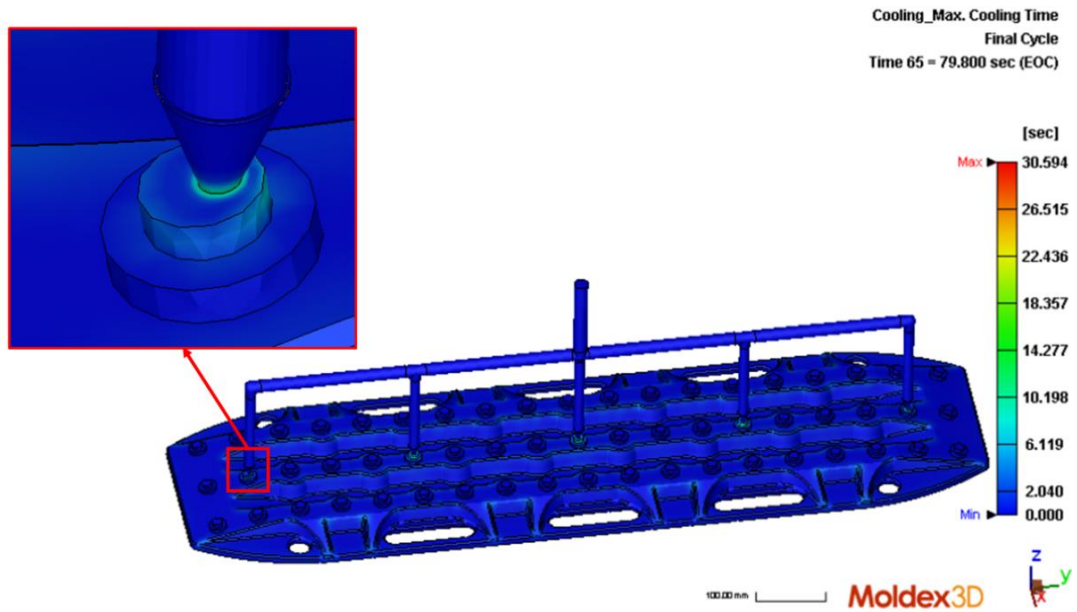


Figura 4.38 - Tempo de arrefecimento da peça e dos canais de alimentação [70].

A Figura 4.39 ilustra os resultados da simulação do empeno da peça, tendo em conta as três direções (x, y, z).

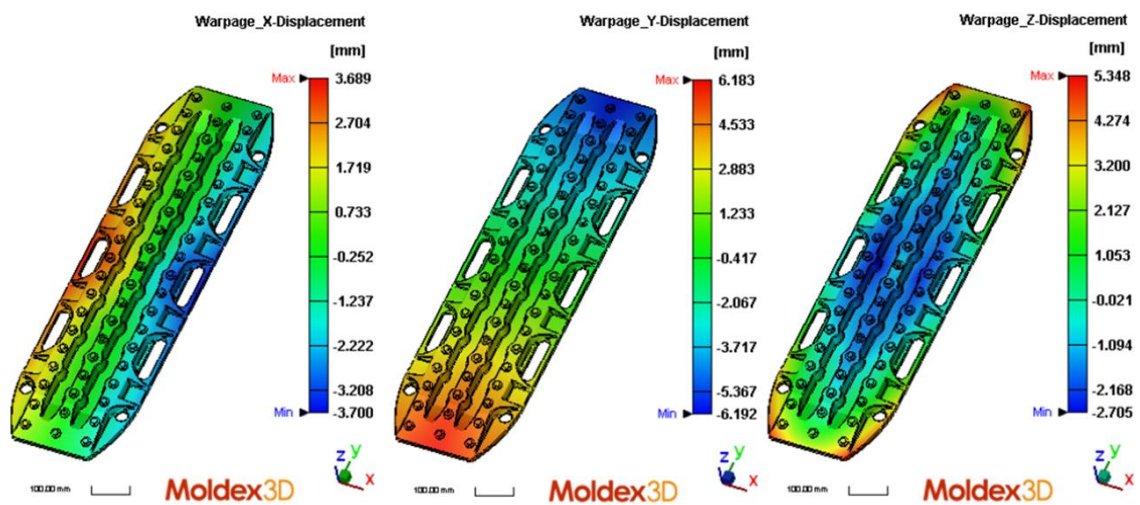


Figura 4.39 - Simulação do empeno da peça segundo as direções x, y e z [70].

A Figura 4.40 ilustra o resultado do empeno total na peça, onde as secções mais exteriores da peça são as mais afetadas, na medida em que estas atingem um maior valor deste fenómeno (7.379 mm).

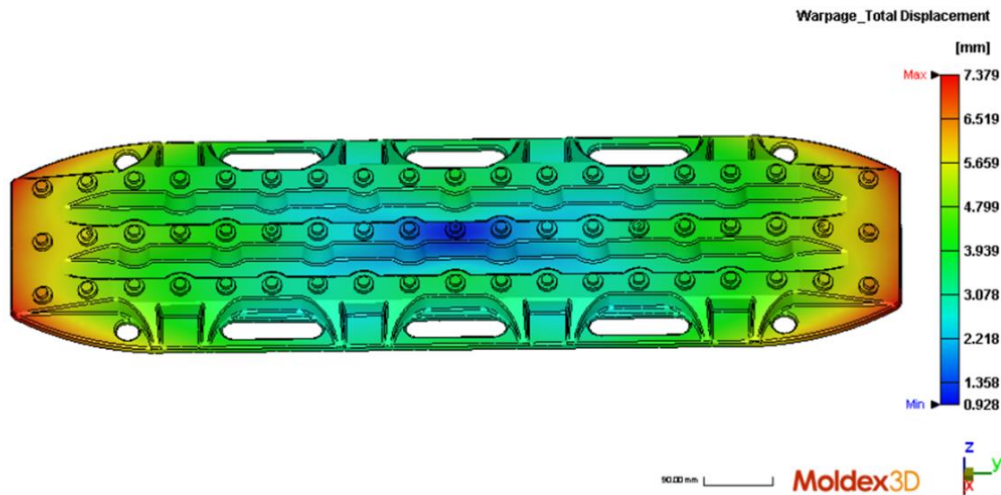


Figura 4.40 - Resultados do empeno total da peça [70].

O tensor de orientação das fibras *Fiber Orientation Density* (FOD), apresentado na Figura 4.41, permite observar a orientação das fibras dependendo de sua posição ao longo da peça. Este tensor vai de 0 a 1, onde 1 representa uma fibra completa alinhada com a direção do fluxo, e 0 representa uma fibra perpendicular à direção do fluxo. Os resultados são coloridos para facilitar a interpretação, em que as cores vermelhas apresentam as zonas da peça onde o tensor se aproxima de 1 e mudando para cores mais frias, tais como roxos e azuis, quando o valor do tensor decresce para 0.

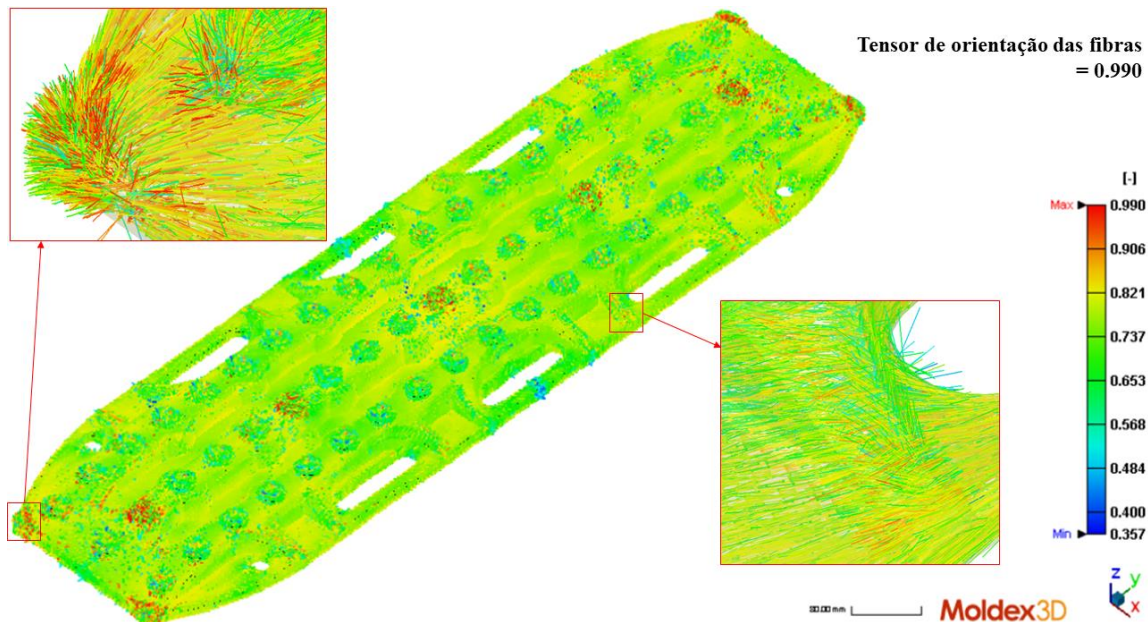


Figura 4.41 - Tensor de orientação das fibras, resultado da simulação do processo convencional [70].

Terminadas as simulações do processo convencional, foram exportadas algumas informações do Moldex3D®. No que diz respeito à exportação, o Moldex3D® permite a exportação dessas informações num determinado formato. Os dados referentes à malha de injeção, são exportados para um ficheiro *.inp e o tensor FOD pode ser extraído para um ficheiro .o2d. Esses ficheiros serão posteriormente importados para o Digimat-MAP.

4.3.9. Simulação do processo Mucell® e interpretação de resultados

Conforme referido anteriormente, após a simulação do processo convencional, foram efetuadas duas simulações do processo Mucell®, com a utilização de duas percentagens em peso diferentes de N₂. Tais simulações tiveram como finalidade, prever o impacto da utilização de gás nas propriedades mecânicas da peça.

Nas Figuras Figura 4.42 e Figura 4.43 são apresentados os principais resultados dessas simulações.

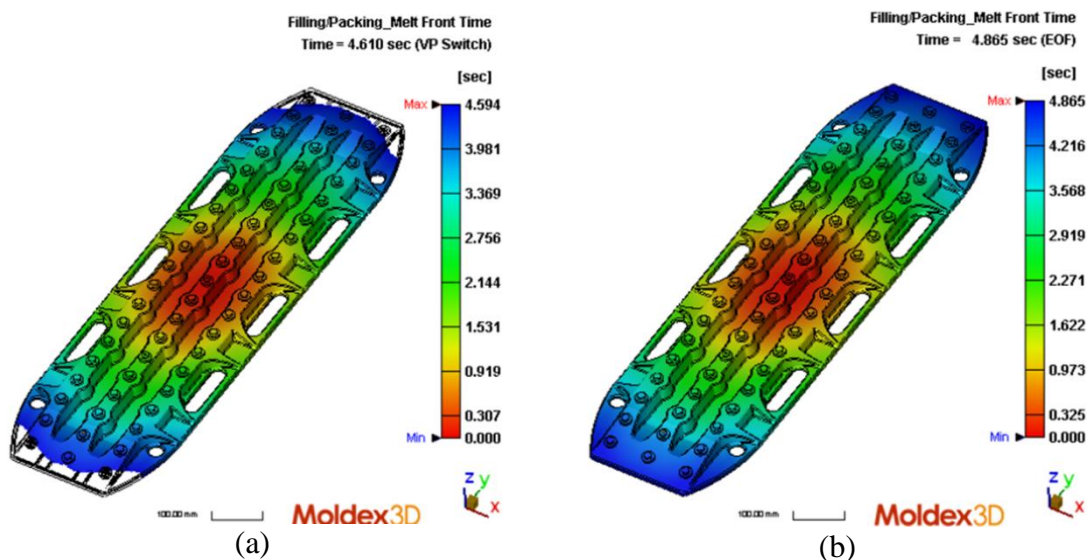


Figura 4.42 - Simulação da etapa de enchimento do processo Mucell® com adição de 5% em peso de N₂. (a) VP Switch 95% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].

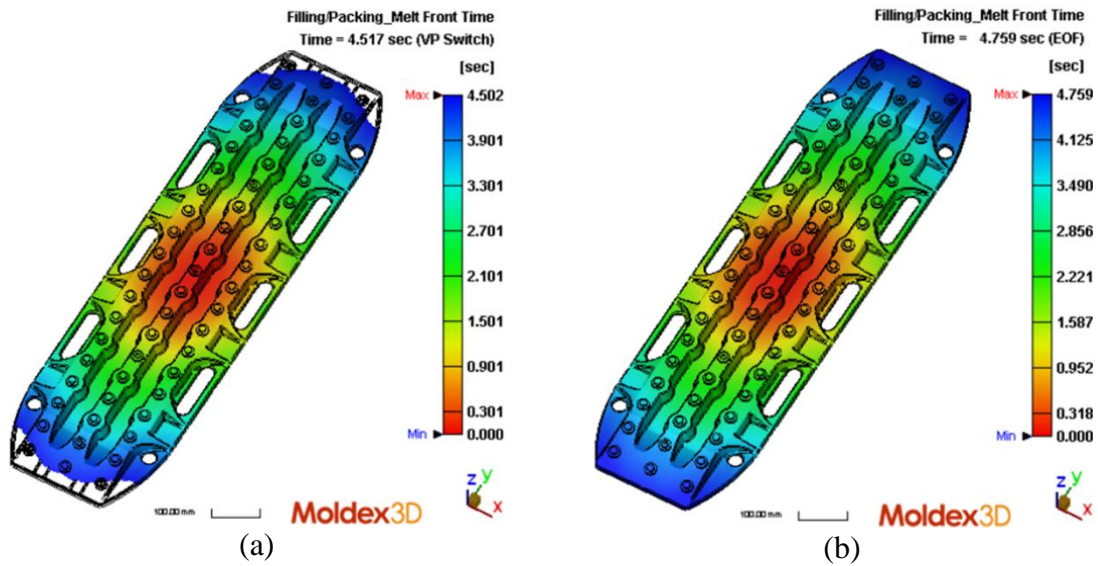


Figura 4.43 - Simulação da etapa de enchimento do processo Mucell® com adição de 10% em peso de N₂. (a) VP Switch 95% do enchimento, (b) Final da etapa de enchimento [70].

As Figuras Figura 4.42a e Figura 4.43a ilustram a captura do momento que corresponde a 95% da fase de enchimento, que é quando ocorre o início da libertação do gás na cavidade. As Figuras Figura 4.42b e Figura 4.43b ilustram os momentos finais das etapas do enchimento. Em ambos os casos, é possível observar que o tempo de enchimento previsto é ligeiramente inferior ao valor inserido inicialmente como *input* para o tempo de enchimento (5.0 s).

É importante também referir que após a etapa do enchimento, é iniciada a fase de compactação. Após a fase de compactação, ocorre a queda de pressão, que irá desencadear a nucleação das bolhas de gás dentro da cavidade do molde. O crescimento celular ocorre depois durante toda a fase de refrigeração ao final do ciclo.

A Figura 4.44 apresenta a densidade celular, caracterizada pelo número de bolhas por unidade de volume. Um valor mais alto significa mais bolhas por unidade de volume. A densidade microcelular é um resultado tridimensional e pode ser controlada com a concentração de gás inicial do SCF e pela taxa da queda de pressão [36].

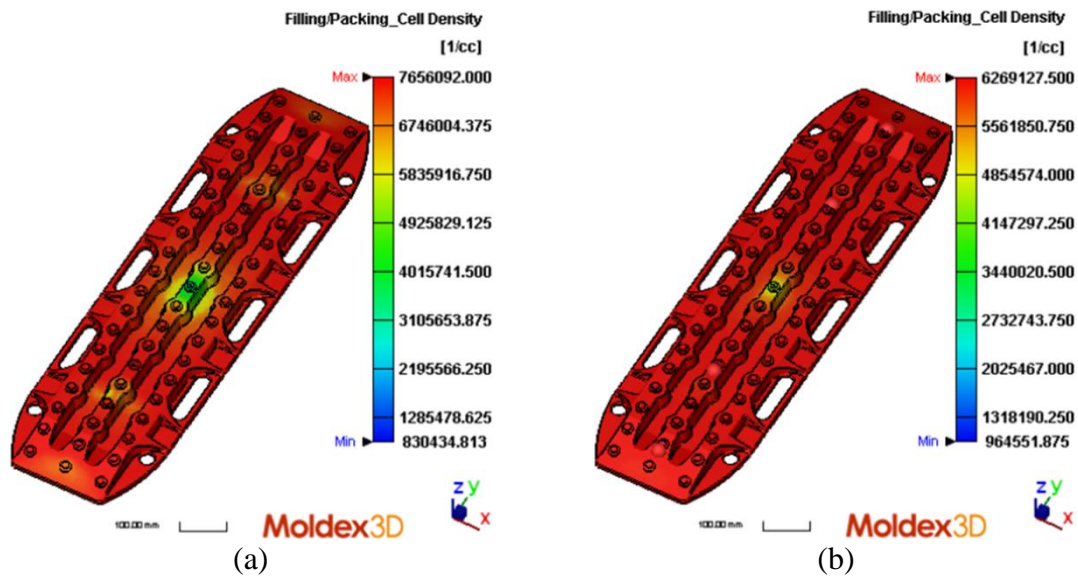


Figura 4.44 – Densidade celular. (a) 5% em peso de N₂, (b) 10% em peso de N₂ [70].

Conforme ilustrado na Figura 4.45, também nestes dois casos surgiram poucas linhas de soldadura na peça.

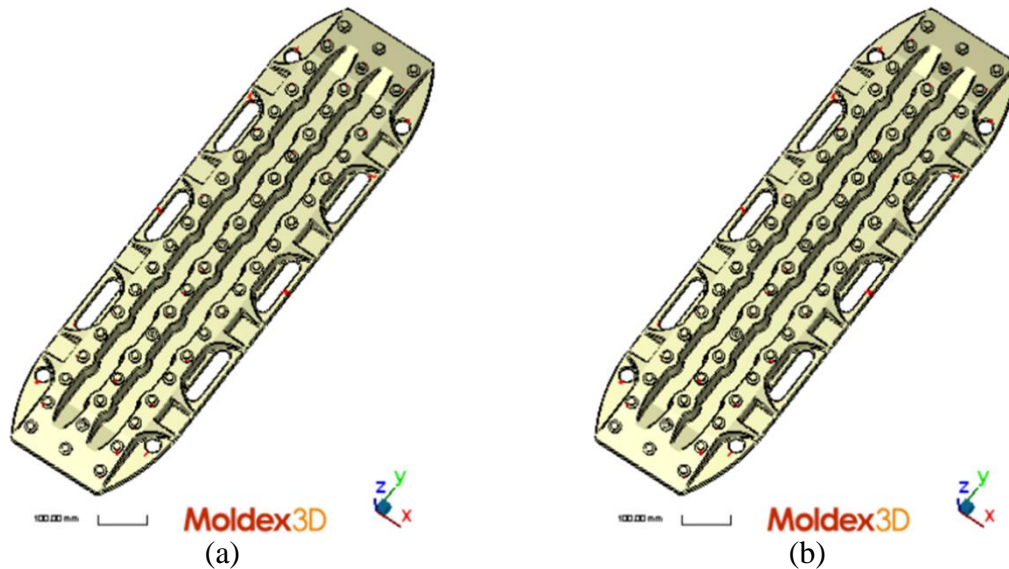


Figura 4.45 – Linhas de soldadura. (a) 5% em peso de N₂, (b) 10% em peso de N₂ [70].

A Figura 4.46 ilustra a previsão da localização de chupados. Como benefício do processo Mucell®, estimasse que haja uma redução das zonas onde ocorre este fenómeno, assim como uma diminuição dos valores máximos, quando comparando com os valores obtidos na simulação do processo de injeção convencional.

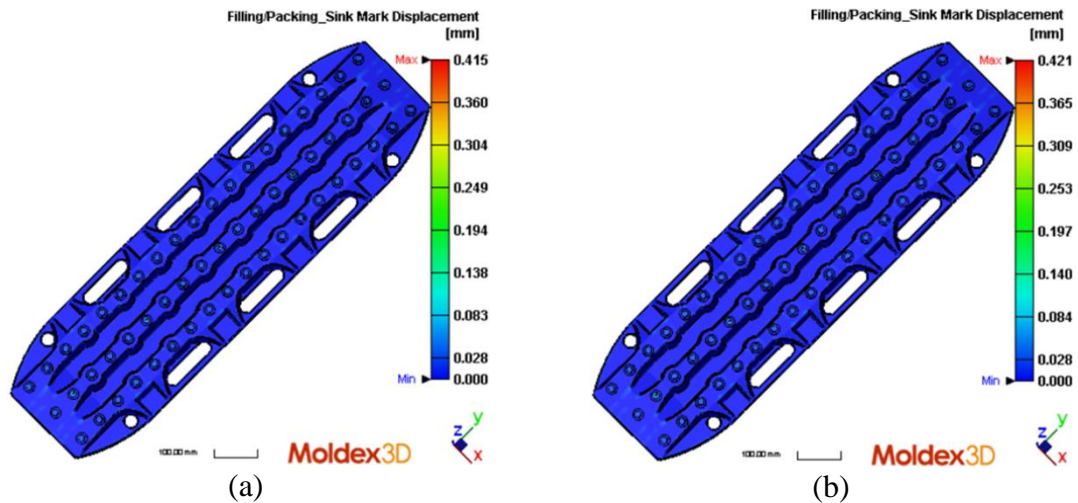


Figura 4.46 - Previsão de chupados. (a) 5% em peso de N₂, (b) 10% em peso de N₂ [70].

As curvas características da distribuição de pressão na cavidade, são ilustradas no gráfico da Figura 4.47, onde é possível observar que os valores em ambas as simulações são muito semelhantes.

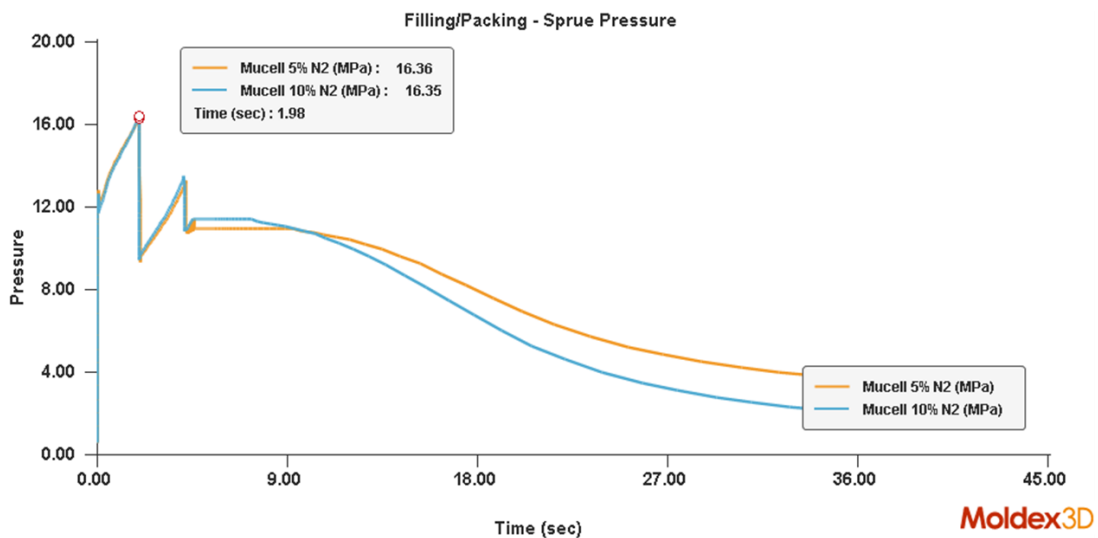


Figura 4.47 - Gráfico da pressão de injeção em função do tempo [70].

As curvas que caracterizam o comportamento da força de fecho podem ser observadas no gráfico da Figura 4.48.

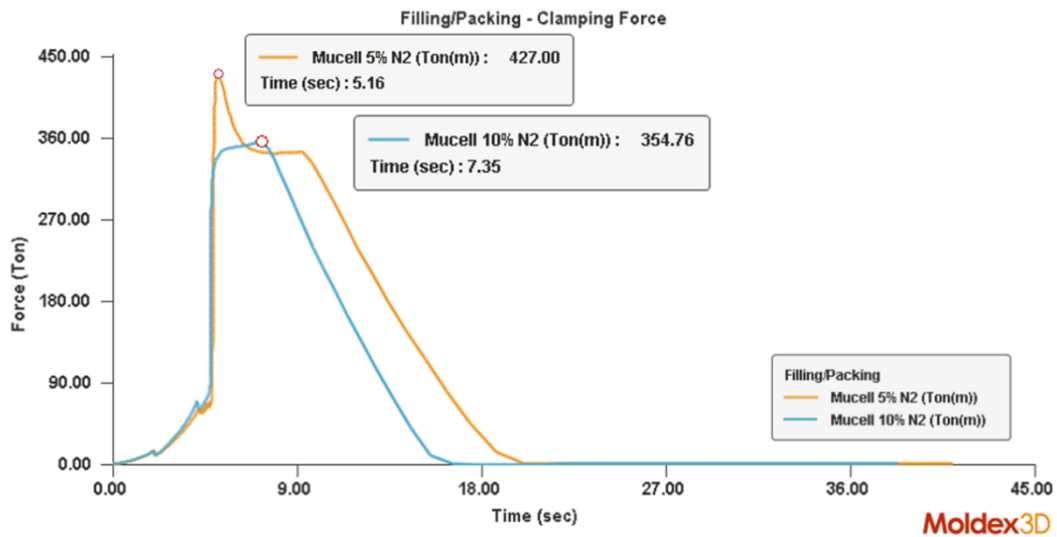


Figura 4.48 - Perfil da força de fecho em função do tempo [70]

A Figura 4.49 ilustra os resultados dos empenos totais na peça, onde as secções mais exteriores da peça são novamente as mais afetadas, atingindo valores que vão desde 4.042 a 4.575 mm.

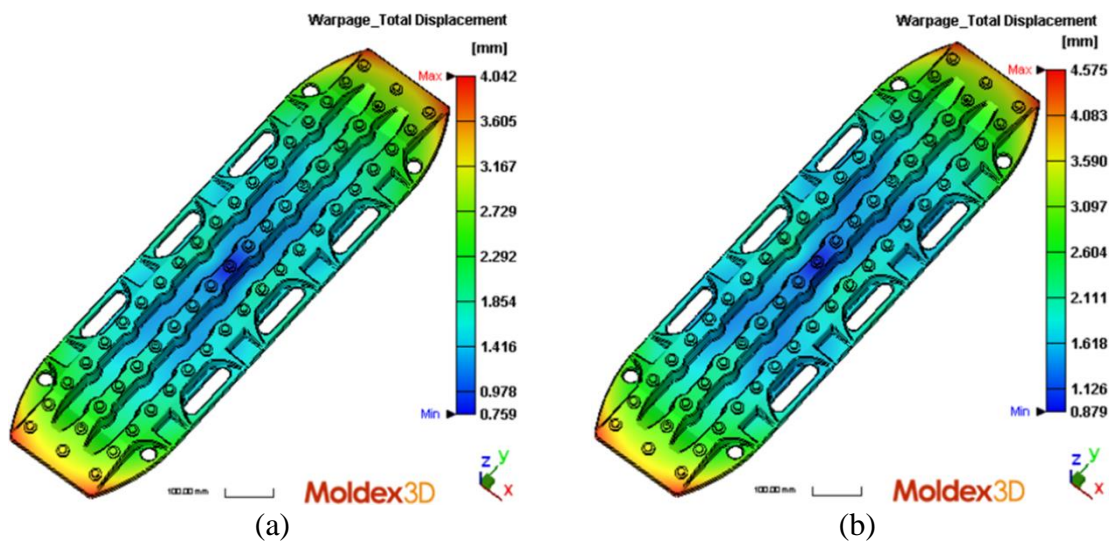


Figura 4.49 - Empeno total com o processo Mucell®.
(a) 5% em peso de N₂, (b) 10% em peso de N₂ [70].

Finalmente, na Figura 4.50 são apresentadas as orientações das fibras de ambas as simulações. Com o aumento do teor de N₂, o valor médio do tensor de orientação das fibras diminui, o que é particularmente mais evidente nas zonas de ataque da peça. Este fenómeno

provavelmente ocorre devido à movimentação das fibras na matriz polimérica causada pelo alargamento dos poros que circundam as fibras.

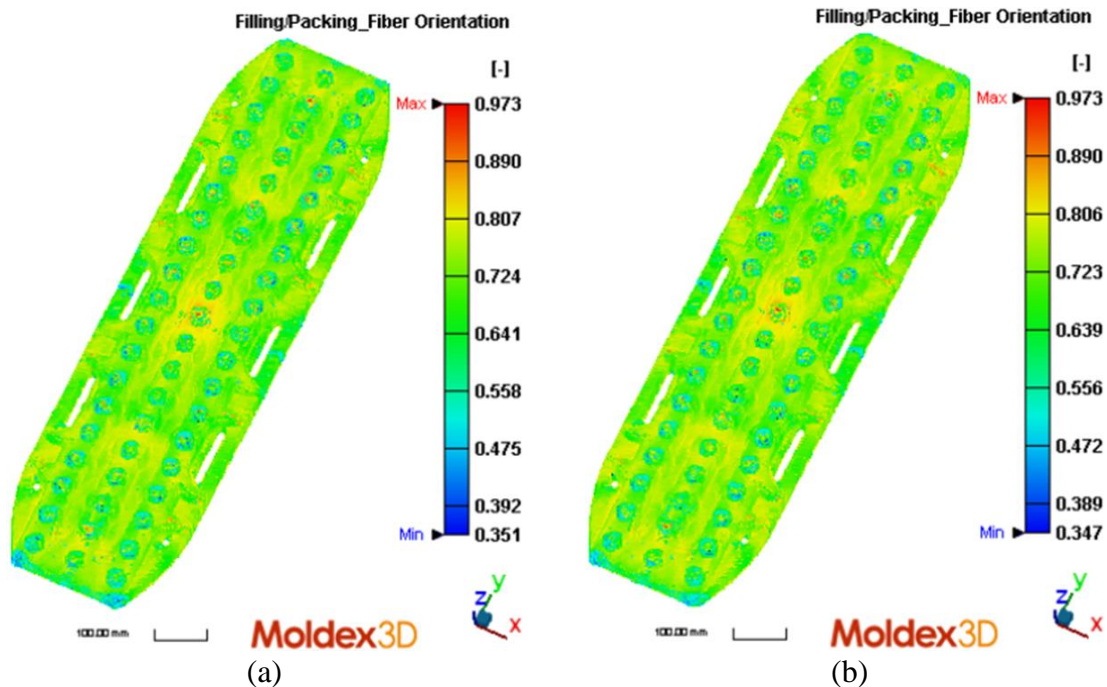


Figura 4.50 - Tensor de orientação das fibras, resultado da simulação do processo convencional.
(a) 5% em peso de N₂, (b) 10% em peso de N₂ [70].

Terminadas as simulações do processo Mucell[®], foram mais uma vez exportadas do Moldex3D[®] as informações necessárias para a próxima etapa. Os dados exportados a destacar são o tensor da orientação das fibras (FOD) e a informação da porosidade.

O Moldex3D[®] permite a exportação dessa informação recorrendo à interface FEA, para um ficheiro *.m2d*. Esse ficheiro será importado para o Digimat-MAP numa outra etapa para a execução do modelo final.

4.4. Criação do modelo do material

Para a criação do material com propriedades anisotrópicas, homogeneizado, recorreu-se às abordagens semi-analíticas do método MFH do módulo Digimat-MF.

Os dados de entrada necessários para o Digimat-MF são:

- as propriedades dos materiais – matriz e fibra
- microestrutura – geometria da fibra, razão de aspeto (*aspect ratio*) e fração mássica.

Conforme referido anteriormente, o material utilizado na simulação numérica foi o Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30, uma poliamida 66 com 30% de fibra de vidro. De forma a modelar virtualmente este material são necessárias as propriedades mecânicas da matriz e da fibra. Para este caso de estudo, como não foi possível obter experimentalmente essas propriedades, a seleção e definição das propriedades necessárias foi realizada com base em materiais equivalentes existentes na base de dados do Digimat®, na diversa literatura referenciada [70, 92, 93, 94, 95, 96] e com base na comparação de diversas simulações previamente efetuadas.

Para a modelação do material foi utilizado o modelo de Mori-Tanaka para a homogeneização das inclusões e os modelos de materiais de Elasto-plasticidade *J2/Von-Mises* e de Elasticidade, que representam o comportamento da matriz e do reforço respetivamente. Para estes é necessária informação relativamente às propriedades e microestrutura dos diferentes componentes (matriz e fibra) que compõem o material compósito. O modelo de homogeneização de Mori-Tanaka, é normalmente utilizado para determinar as propriedades de materiais homogêneos [97].

Inicialmente, começou-se por definir um modelo denominado PA66-GF30, constituído por PA6 para a matriz e por fibras de vidro para a inclusão. Os primeiros dados a serem introduzidos no modelo estão relacionados com parâmetros de carácter geral, como o sistema de unidades, o tipo de análise para o qual o modelo será executado e o esquema de homogeneização. Para além disso, também devem ser definidos os parâmetros de integração para a caracterização inicial do modelo. Neste caso, para os parâmetros de controlo da homogeneização, equilíbrio de carregamento, esquema de integração, incremento mínimo e máximo do intervalo de tempo, foram mantidos os valores padrão. Estes primeiros passos, são ilustrados com maior detalhe na Figura 4.51.

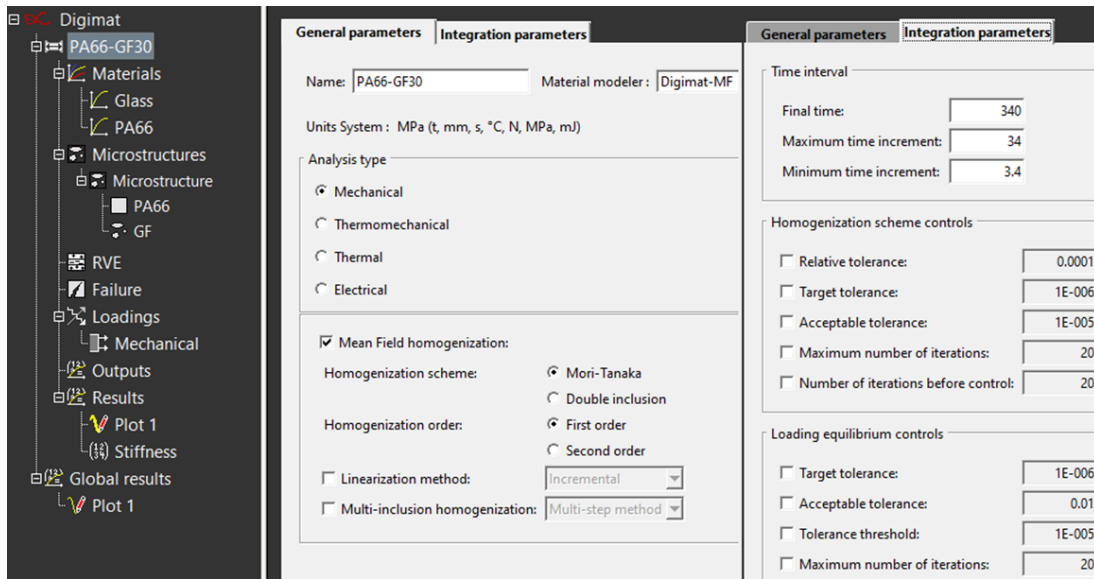


Figura 4.51 - Parâmetros gerais e de integração [74].

No passo seguinte, cada propriedade do material deve ser definida individualmente. Nessa definição, para a fibra de vidro foi definido o modelo elástico e sua simetria de elasticidade considerada isotrópica. No que diz respeito à PA66 (matriz), foi definido o modelo elastoplástico de plasticidade $J2$.

Conforme ilustrado na Figura 4.52, no caso da fibra de vidro, foi definida uma densidade de $2.54e^{-9}$ g/mm³, um módulo de elasticidade de 72000 MPa e um coeficiente de *Poisson* de 0.22. Valores inseridos com base na literatura [94].

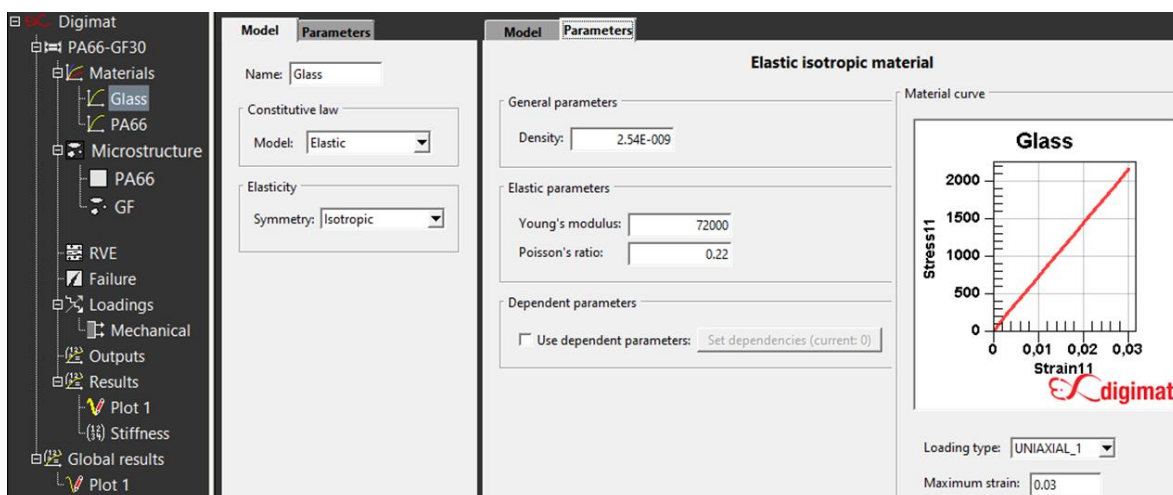


Figura 4.52 - Curva elástica da fibra de vidro [74]

De modo a realizar estas simulações, para o caso do modelo *J2/Von Mises*, foi necessário o estudo das três variáveis do endurecimento (*Hardening*) que fazem parte das propriedades necessárias para a criação do modelo da matriz (Figura 4.53). Sendo esta uma área complexa, optou-se por utilizar os valores do material nas bases de dados e na literatura pesquisada. Informações mais detalhadas sobre estas variáveis podem ser encontradas na obra de Ronaldo I. Borja [93].

Posto isto, o modelo da matriz (PA66) foi definido com uma densidade de $1.14 \times 10^{-9} \text{ g/mm}^3$, um módulo de elasticidade de 3000 MPa, módulo de endurecimento 22 MPa, expoente de endurecimento 172 MPa, módulo de endurecimento linear 2 (Figura 4.53).

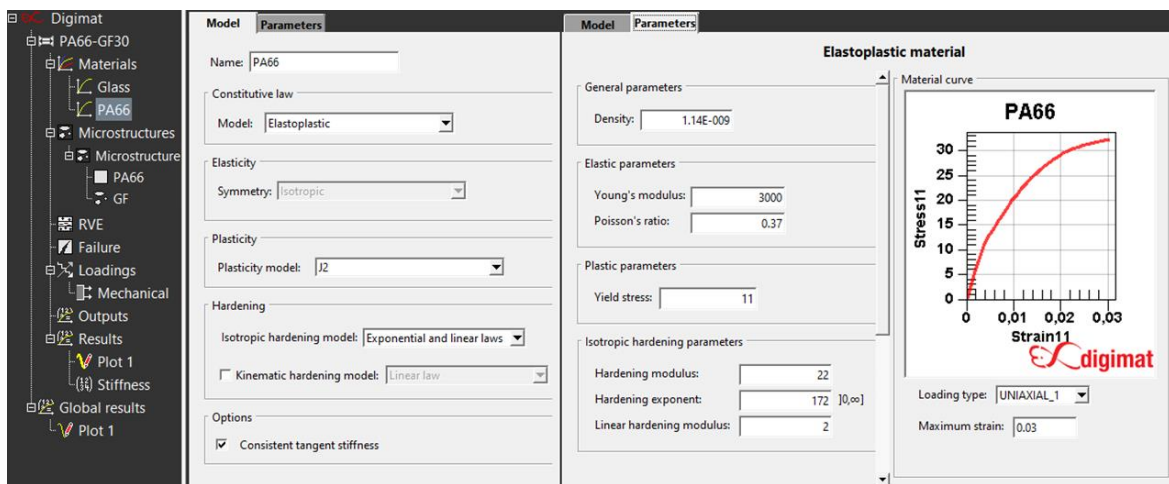


Figura 4.53 - Curva elasto-plástica da matriz PA66 [74]

A próxima etapa envolveu a definição da microestrutura do PA66-GF30. Este material é composto por uma matriz polimérica de Poliamida 66, com uma fração mássica de 30% fibras de vidro. A Figura 4.54 ilustra como foram introduzidos esses parâmetros no Digimat-MF.

A fase de fibra requereu a definição de parâmetros adicionais. A fração mássica das fibras sobre a PA66 foi definida para 30% e relação de aspeto da fibra com num valor de 24. As relações de aspeto comuns para polímeros reforçados com fibras curtas estão compreendidas entre 7 e 30 [94, 95, 96]. Os valores utilizados para definir o tensor de orientação da fibra apresentados na Figura 4.54, foram definidos com base na literatura [94, 95, 96].

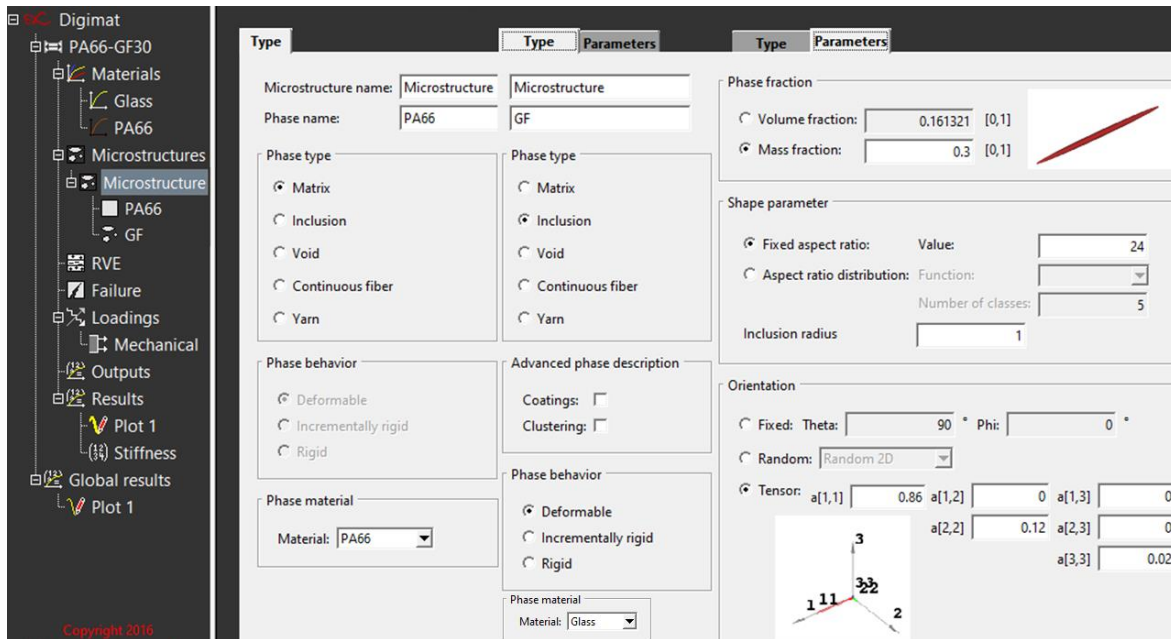


Figura 4.54 - Parâmetros da fibra de vidro e da matriz PA66 [74].

Após a definição da microestrutura, foram definidas as condições de carregamento mecânico. Essas opções foram mantidas com os valores padrão do Digimat-MF (Figura 4.55).

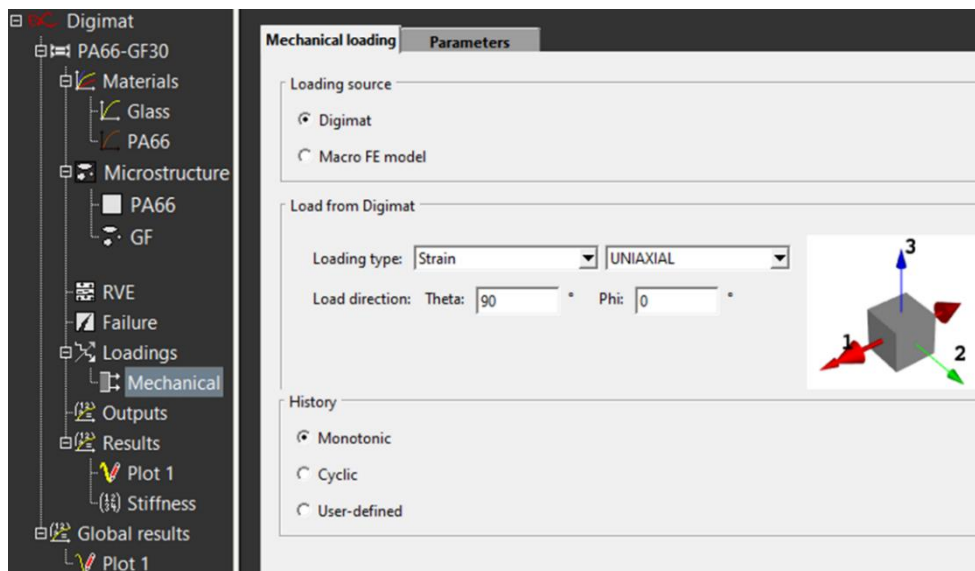


Figura 4.55 - Definição de carregamento mecânico [74].

Estando todos os parâmetros devidamente definidos, procedeu-se à simulação constitutiva do material. O processo de homogeneização teve curta duração e uma vez convergido, o

modelo resultante foi um material polimérico reforçado com fibras curtas, anisotrópico homogeneizado. A curva tensão-deformação do modelo homogeneizado resultante é apresentada na Figura 4.56.

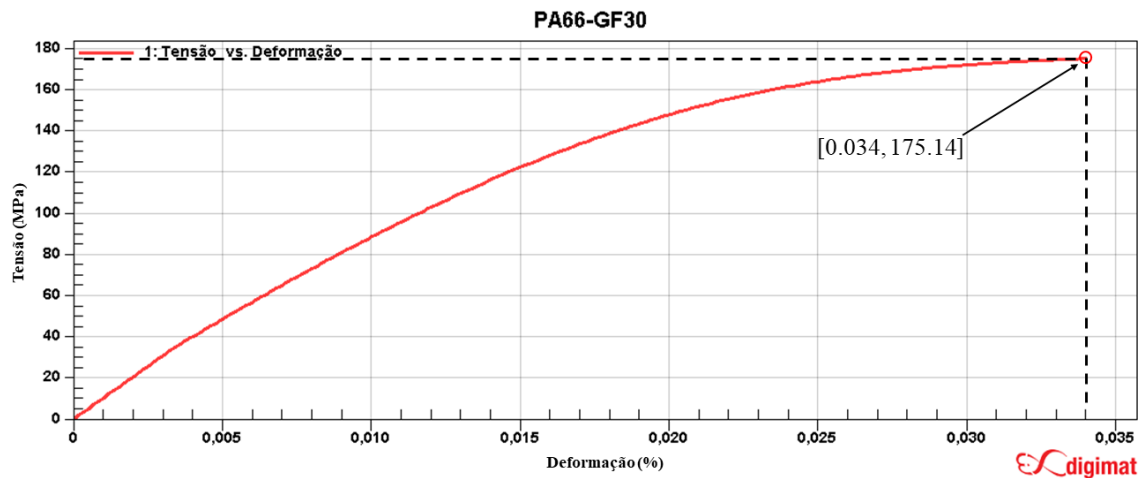


Figura 4.56 - Curva tensão-deformação do modelo homogeneizado resultante [74].

Os resultados obtidos, contendo a matriz de conformidade, a matriz de rigidez e todas as constantes de engenharia adequadas à simetria elástica anisotrópica são apresentados na Figura 4.57.

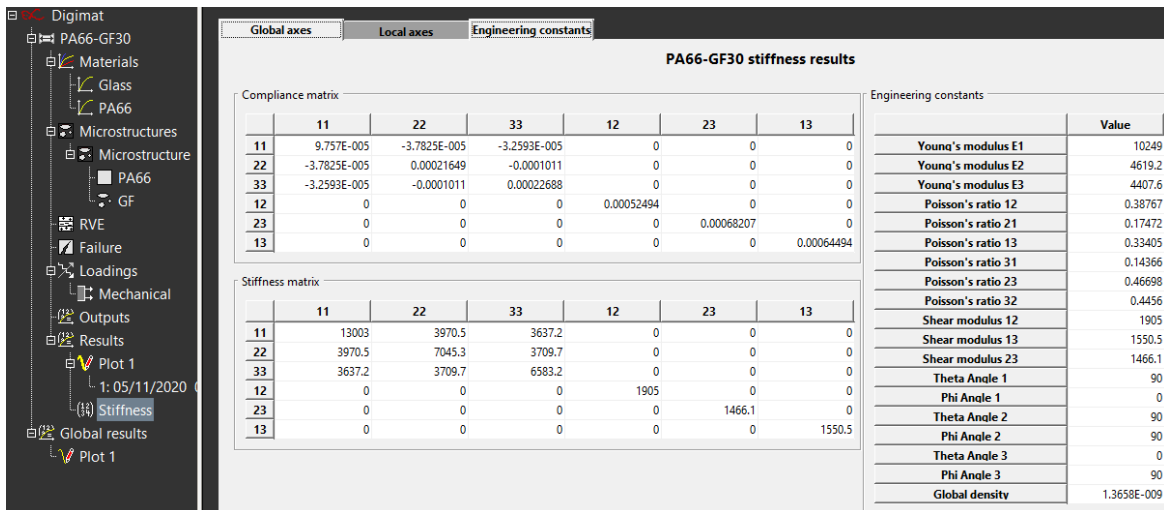


Figura 4.57 - Matriz de conformidade, rigidez e constantes de engenharia do modelo resultante do PA66-GF30 [74].

Esta última informação é a mais importante do modelo, dado que é a informação que define o próprio modelo. É possível observar na Figura 4.57, como as constantes de engenharia (não nulas) caracterizam as propriedades anisotrópicas do material.

Para o modelo criado, o módulo de *Young* para E1 (direção longitudinal) é de 10249 MPa. A tensão de rutura, de acordo com a curva de referência mostrada na Figura 4.56, terá um valor estimado na direção E1 de 175.14 MPa.

Na Tabela 3.1 foram mostrados os valores do módulo *Young* e tensão de rutura que normalmente servem de referência para as PA66-GF30. De outra fonte (Anexo III), podem ser obtidas as propriedades mecânicas para o Ultramid® A3EG6-PA66-GF30. Juntando as duas fontes, obtém-se um intervalo de valores entre 10500 e 7000 Mpa para o módulo de *Young*, e 190 a 130 MPa para a tensão de rutura. Assim sendo, conclui-se que os valores obtidos para o modelo estão bem enquadrados dentro destes intervalos.

4.4.1. Criação do modelo do material para análise da porosidade

De modo a tornar possível mapear a informação da porosidade microcelular gerada pelas simulações do processo Mucell®, foi necessário criar um modelo de material adicional para o efeito. Para a criação desse modelo, foram mantidos todos os dados relativos à microestrutura do modelo criado anteriormente para a simulação do processo de injeção convencional (PA66-GF30), no entanto, para este foi necessário adicionar uma terceira fase à sua microestrutura.

Esta terceira fase, denominada por “fase do vazio” (*Void*), que como o próprio nome indica, refere-se à capacidade do Digimat® de modelar inclusões de ar num material compósito. Na fase *Void*, a rigidez é assumida como zero e nenhum material necessita de ser associado a esta [73]. Quanto à parte da inclusão, é necessário introduzir alguns parâmetros de configuração fase, relacionados com o conteúdo, forma e orientação dos espaços vazios. Na Figura 4.58 é apresentada uma ilustração desta terceira fase *Void* e dos respetivos parâmetros de inclusão utilizados para este caso de estudo.

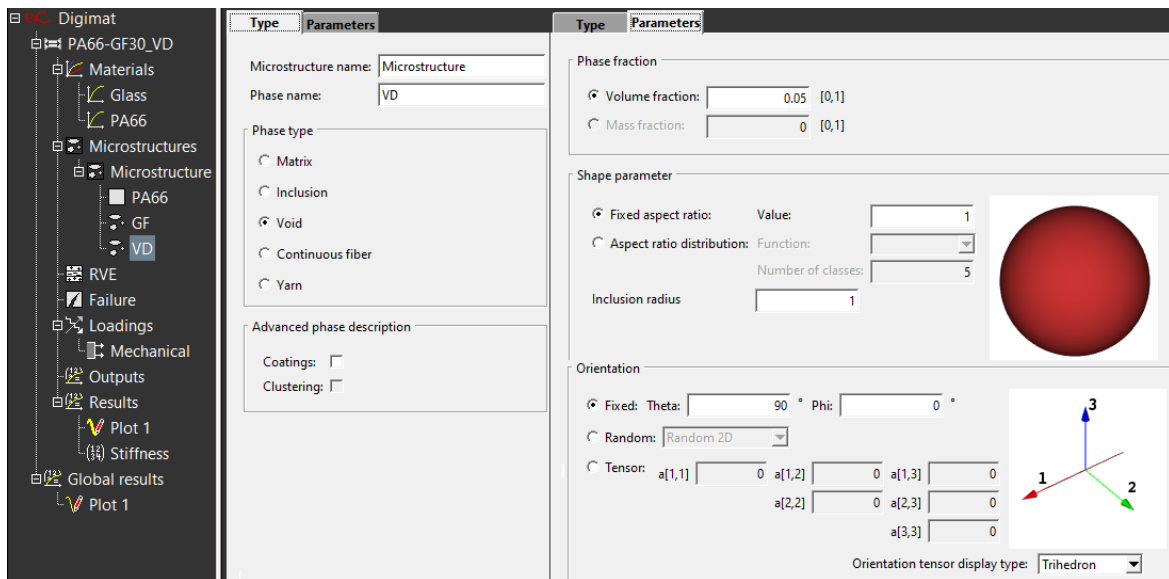


Figura 4.58 - Fase *Void* e respectivos parâmetros de inclusão [74].

Analisando os parâmetros de inclusão apresentados, a fração volúmica é o parâmetro que simula qual o volume de espaços vazios (porosidade) dentro do RVE. Com base neste parâmetro, foi criada então uma microestrutura diferente, com auxílio da literatura [98, 99], onde foi atribuído o valor para a fração volúmica 0.05, que corresponde à percentagem volúmica de 5% N_2 libertada na cavidade do molde, definida na simulação do processo (Tabela 4.3).

Note-se que, este foi o único parâmetro diferente nas duas microestruturas criadas, pelo que nesta secção de capítulo apenas será abordada esta terceira fase.

O parâmetro de forma serve para definir a relação de aspeto da fibra L/D de uma inclusão modelada tridimensionalmente com a geometria de um esferoide, onde L é o comprimento ao longo do eixo de revolução (3 no sistema de eixos representado na (Figura 4.59) e D é o diâmetro no plano ortogonal ao eixo de revolução [73]. Neste caso, a razão de aspeto definida foi de um, o que corresponde à forma geométrica de uma esfera.

O raio de inclusão serve para definir o tamanho real das inclusões e este deve ser estritamente positivo. Este valor só é útil se foi definida uma fase de revestimento em torno da fase de inclusão. O raio de inclusão também servirá para calcular a fração de volume ou a fração de massa dessa fase de revestimento [73]. Neste caso optou-se por manter o valor padrão 1.

A definição da orientação é um parâmetro importante da caracterização da fase de inclusão, pois é o principal motivo da anisotropia do material compósito. Este define o modo como é distribuída a inclusão no RVE. É representado por um vetor unitário p , alinhado com o eixo de simetria da inclusão e existem quatro possibilidades para definir a orientação das inclusões, que podem ser consultadas com detalhe na literatura [73]. Neste caso, manteve-se a opção padrão “Fixed”, com $\theta=90^\circ$ e $\phi=0^\circ$.

Ao escolher a opção “Fixed”, considera-se que todas as inclusões contidas no RVE são alinhadas na mesma direção. O vetor de orientação p é definido por dois ângulos esféricos: θ e ϕ . Onde, θ é o ângulo em graus entre o eixo 3 e o vetor de orientação p , enquanto que ϕ é o ângulo em graus entre o eixo 1 e a projeção do vetor de orientação p no plano (1,2) [73]. A Figura 4.59 ilustra p , θ e ϕ .

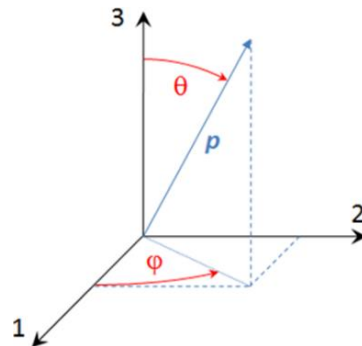


Figura 4.59 - A definição dos eixos é baseada nos ângulos θ e ϕ , definindo o vetor de orientação p [73].

A curva de referência tensão-deformação do novo modelo homogeneizado do material com a inclusão de 5% de bolhas, é apresentada na Figura 4.60.

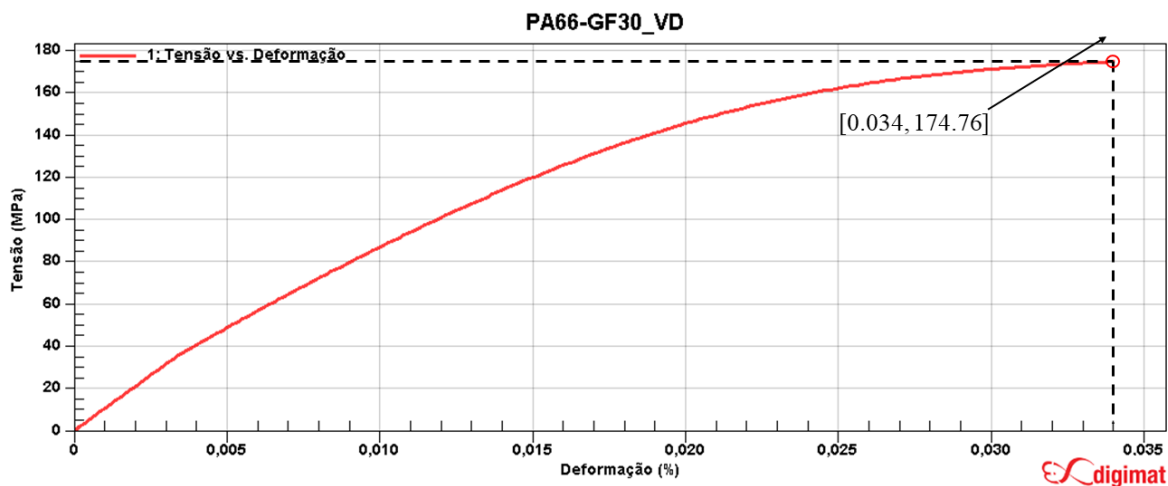


Figura 4.60 - Curva tensão-deformação do modelo PA66-GF30_VD com a inclusão da porosidade [74].

Os resultados obtidos, contendo a matriz de conformidade e a matriz de rigidez são apresentadas na Figura 4.61.

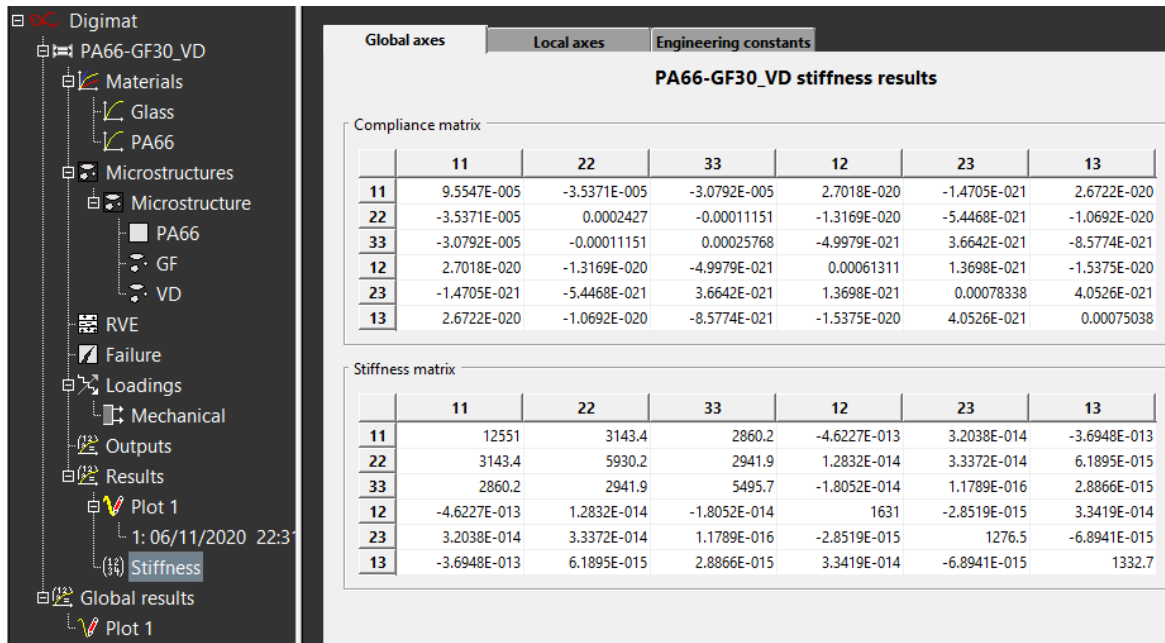


Figura 4.61 - Matriz de conformidade e a matriz de rigidez do PA66-GF30_VD [74].

Os ficheiros de análise contendo o modelo do material foram guardados na base de dados interna do Digimat-MX para servirem posteriormente como entrada no módulo Digimat-CAE.

4.5. Mapeamento da orientação das fibras e da distribuição microcelular

No Digimat-MAP foi realizado o mapeamento da orientação das fibras e da distribuição microcelular para os processos de injeção convencional e Mucell[®]. Os mapeamentos foram efetuados a partir da malha do processo (Moldex3D[®]) para a malha estrutural modificada (ABAQUS/CAE). Foram feitas três análises separadas no Digimat-MAP, dais quais resultaram três ficheiros *.*dof* contendo os dados mapeados.

A Figura 4.62 ilustra as etapas da primeira análise. Inicialmente foi utilizada como entrada a malha do Moldex3D[®] para o campo “Malha dadora” (*Donor Mesh*) e o tensor de orientação das fibras (ficheiro *.*o2d*). Este último será integrado na malha do Moldex3D[®], portanto

aparece como entrada na “Malha dadora”. Seguidamente a malha do ABAQUS/CAE foi utilizada como uma entrada para o campo “Malha recetora” (*Receiving mesh*).

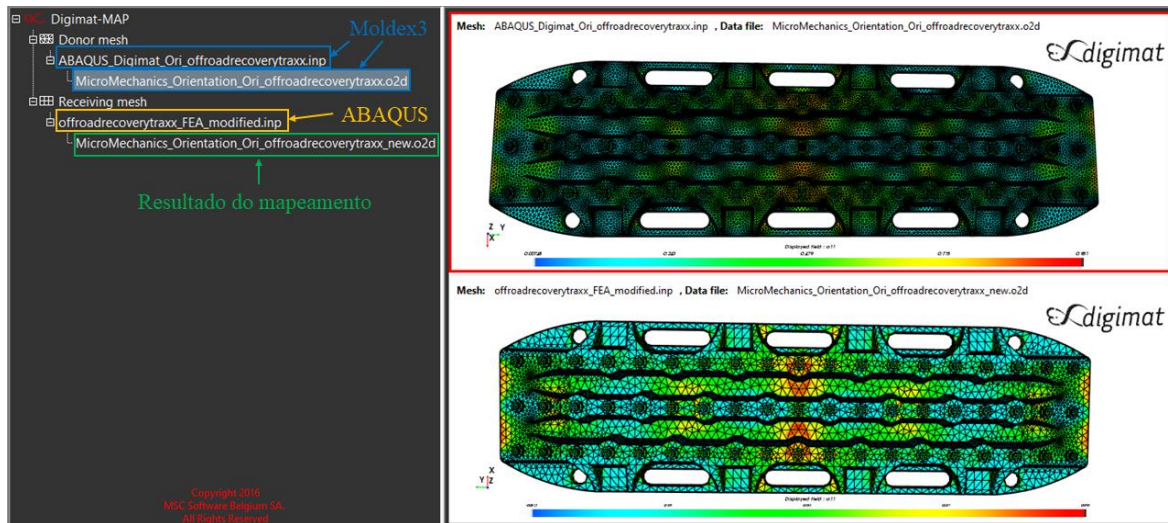


Figura 4.62 - Mapeamento da “Malha recetora” [74].

Depois de algum tempo de cálculo computacional, os resultados surgiram dentro da “Malha recetora”, na qual foi mapeado o tensor de orientação das fibras. O resultado da análise pode ser observado na Figura 4.62, onde é possível visualizar os diferentes refinamentos de malha e a da distribuição da fibra (que surge com intensidade diferente em ambos os modelos).

Uma vez que foi definido um tamanho de elemento mais pequeno para a malha “Malha dadora” (10mm), do que para a malha recetora (12mm), os dados foram mapeados para a “Malha recetora” sem que ocorressem erros no *software*.

Para a segunda análise foi repetido o procedimento anterior, no entanto, foi utilizada como entrada para a “Malha recetora”, a malha e respetivo tensor de orientação das fibras resultantes do processo Mucell® e para a “Malha dadora”, novamente a malha estrutural modificada.

Numa terceira análise, foi utilizado como entrada para a “Malha recetora”, a malha de injeção do processo Mucell® e respetivo ficheiro *.m2d contendo a informação relativa à porosidade. Figura 4.63 é ilustrada uma representação da distribuição microcelular no Digimat-MAP, referente à simulação do processo Mucell® com uma percentagem volúmica de 5% de N₂.

É importante referir que estas duas operações foram efetuadas em separado, porque o módulo Digimat-MAP só permite mapear uma inclusão de cada vez deste tipo.

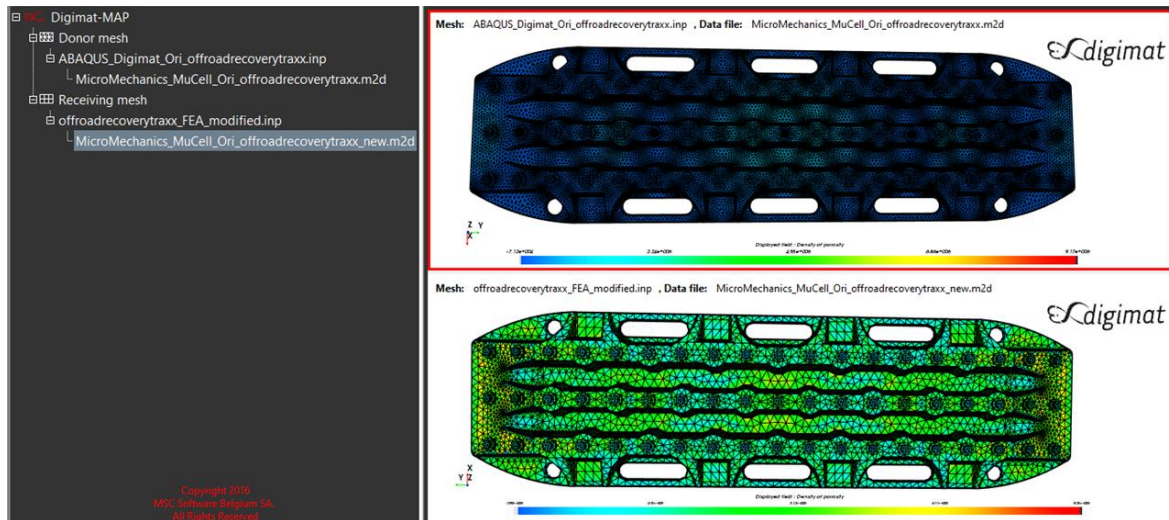


Figura 4.63 - Mapeamento da porosidade microcelular [74].

Posteriormente efetuou-se uma quarta e última análise, que foi basicamente uma repetição na terceira análise, mas contento os dados relativos à porosidade microcelular do processo Mucell[®] com a utilização de 10% em peso de N₂. Isto porque para volumes diferentes de gás utilizados, as respetivas porosidades também são diferentes.

A partir dos resultados fornecidos pelo Digimat-MAP, os modelos mapeados foram guardados num ficheiro em formato *.dof. É com base nesses ficheiros gerados que é introduzida a influência da orientação das fibras e da porosidade microcelular no modelo numérico do material.

Os modelos numéricos gerados foram utilizados como entrada no módulo Digimat-CAE na etapa seguinte.

4.6. Criação de modelo único para integração

A criação do modelo único para integração no *software* de análise estrutural FEA foi feita no módulo Digimat-CAE, no qual foi feita a combinação dos tensores de orientação das fibras, da porosidade do processo Mucell[®] e dos materiais criados no Digimat-MF num único modelo.

Na primeira etapa foram gerados os ficheiros de acoplamento para a simulação estrutural da peça com a tendo em conta a influência do processo de injeção convencional. Para isso, foi importado o ficheiro do material do Digimat-MF referente ao processo de injeção convencional (PA66-GF30) criado anteriormente. Após a importação da informação do material, foi definida a interface estrutural FEA a utilizar (neste caso o Abaqus/Standard) e foi importado o ficheiro contendo o tensor com a orientação das fibras gerado pelo Digimat-MAP. Os parâmetros de integração foram mantidos com os valores padrão. Finalmente, foi executada a análise numérica.

A Figura 4.64 ilustra a importação da informação da orientação das fibras para o Digimat-CAE.

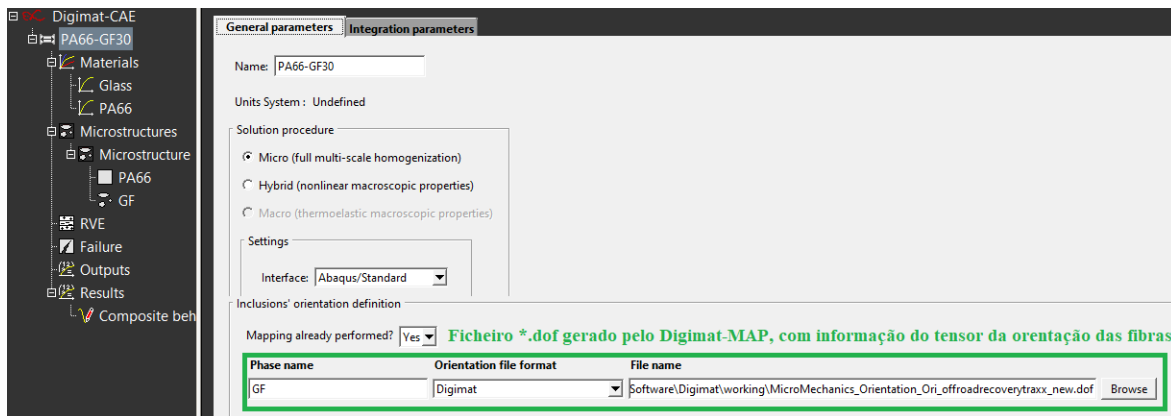


Figura 4.64 - Importação do tensor da orientação das fibras para o Digimat-CAE [74].

Terminada a análise, foram gerados três ficheiros de acoplamento para serem dados como entrada no ABAQUS/CAE. Cada um desses ficheiros tem a seguinte finalidade [73]:

- Ficheiro **.mat* – lista toda a informação referente ao material criado no Digimat-MF. Este é o ficheiro que será utilizado na análise estrutural com propriedades anisotrópicas;
- Ficheiro **.log* – contém uma cópia da informação do ficheiro **.mat* e lista os comentários de execução da análise. Caso haja problemas com a análise, este é o ficheiro que o utilizador deve consultar para localizar a causa dos erros;
- Ficheiro **.aba* – contém as instruções e a informação de todas as variáveis de estado necessárias para executar a simulação acoplada no *software* de análise estrutural FEA.

Na segunda etapa foram gerados os ficheiros de acoplamento para a simulação estrutural da peça tendo em conta a influência do processo Mucell[®]. Inicialmente foi importado o ficheiro do material do Digimat-MF referente ao processo de injeção Mucell[®] com utilização de 5% de N₂ (PA66-GF30_VD). Após a importação da informação do material e da definição da interface estrutural FEA, foram importados os ficheiros contendo o tensor com a orientação das fibras e a informação da porosidade microcelular previamente gerados pelo Digimat-MAP (Figura 4.65). Também neste caso foram mantidos os valores padrão para os parâmetros de integração. Terminada a análise foram gerados os ficheiros de acoplamento.

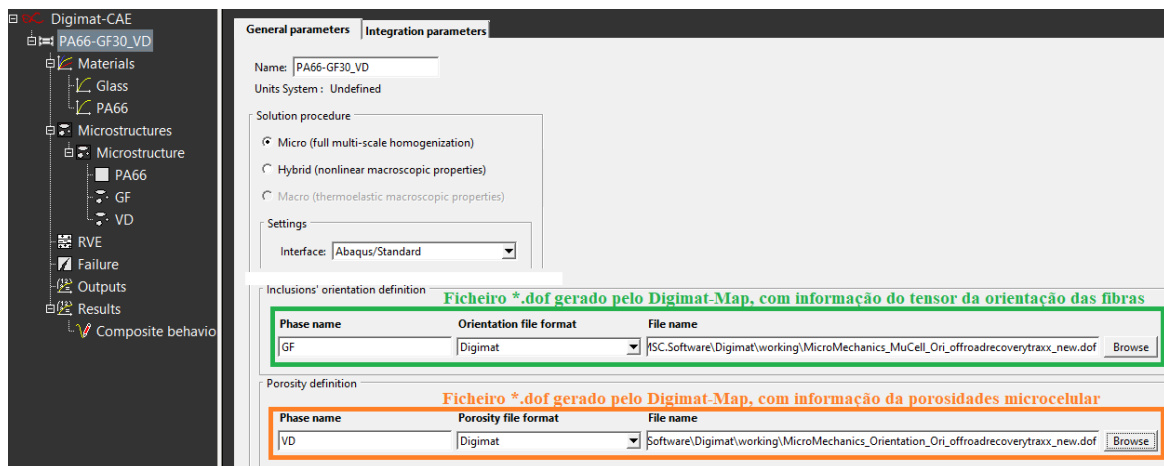


Figura 4.65 - Importação do tensor com a orientação das fibras e a informação da porosidade microcelular para o Digimat-CAE [74].

Finalmente foi executada uma outra análise, que foi basicamente uma repetição desta última, mas onde foram introduzidas as informações do processo Mucell[®] relativos à simulação com a utilização de 10% em peso de N₂.

4.7. Análise estrutural com material com propriedades anisotrópicas

De forma a ser possível efetuar uma análise estrutural acoplada, primeiro é necessário estabelecer uma ligação entre o Digimat-CAE e o ABAQUS/CAE. Isto porque, embora os ficheiros sejam exportados numa linguagem que possa ser lida pelo ABAQUS/CAE, não é possível importá-los diretamente através da interface deste. Assim sendo, foi necessário recorrer a um *plug-in* do Digimat[®], que foi previamente integrado no ABAQUS/CAE. Esta ferramenta dá instruções ao ABAQUS/CAE para ler os ficheiros gerados pelos módulos do Digimat[®], com base numa sub-rotina UMAT. Por outro lado, é possível fazer a integração

dos ficheiros dos módulos do Digimat[®] sem esse *plug-in*, no entanto para isso são necessários conhecimentos de programação informática avançados para criar essa sub-rotina.

De um modo geral, as sub-rotinas são linhas de código introduzidas pelo utilizador, que têm como finalidade aumentar a funcionalidade de vários recursos do ABAQUS/CAE, dado que os métodos normais de entrada de dados são por vezes restritivos. Neste caso, a sub-rotina UMAT serve para definir o comportamento mecânico não linear de um material [100]. O *plug-in* do Digimat[®] (Figura 4.66) cria essa sub-rotina de forma automática, simplificando assim o procedimento de importação do material Digimat[®] para a interface do ABAQUS/CAE.

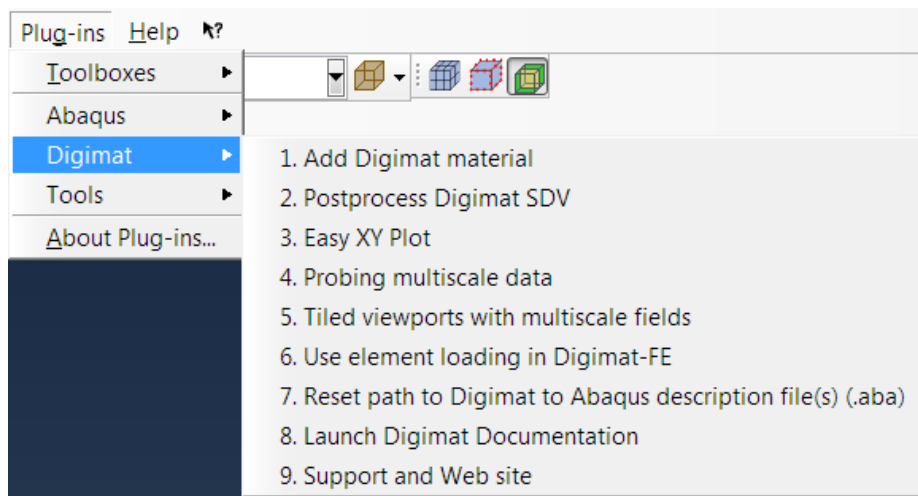


Figura 4.66 - Plug-in Digimat[®] no ABAQUS/CAE [74, 80]

4.7.1. Análise estrutural com influência do processo de moldação por injeção convencional

Uma vez estabelecida a ponte entre o Digimat[®] e o ABAQUS/CAE, foram repetidas as análises estruturais FEA apresentadas no Capítulo 4.2, mas desta vez, considerando a influência do modelo de material anisotrópico e o tensor de orientação de fibras. Os resultados da análise executada ao modelo estrutural, são apresentados na Figura 4.67. Mais uma vez, os resultados apresentados são mantidos dentro dos valores de deslocamento e do campo de tensão, uma vez que estas são as informações mais relevantes para caracterizar o comportamento mecânico da peça.

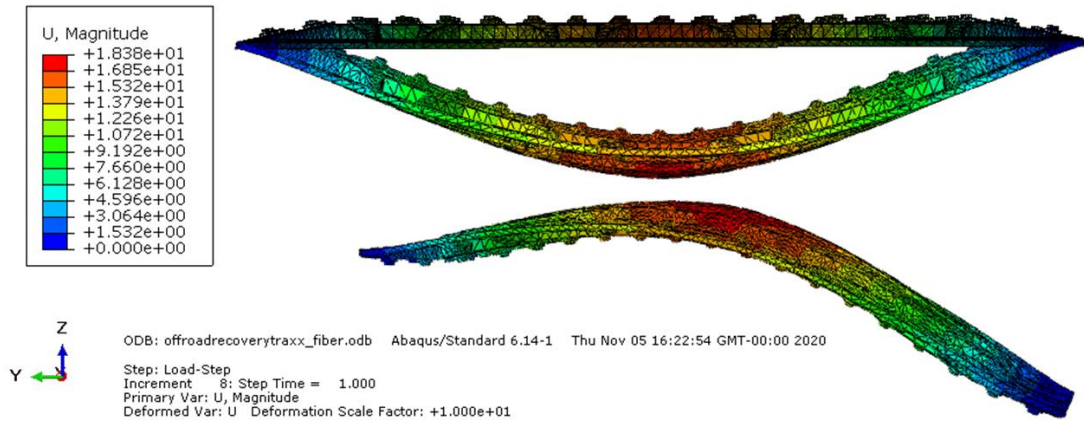


Figura 4.67 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas [80].

O deslocamento máximo estimado no centro da peça de é 18.38 mm por cada 1000N de força aplicada na peça.

Os resultados da análise de tensão crítica *S11* ao longo da peça, são apresentados na Figura 4.68. Este tipo de análise foi escolhido, por ser mais adequado para materiais com propriedades anisotrópicas.

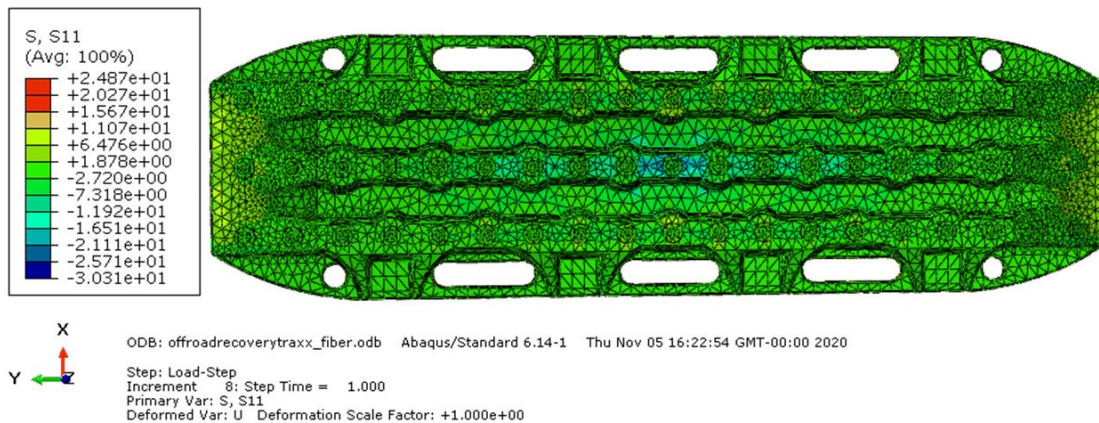


Figura 4.68 - Análise de tensões S11 ao modelo com material com propriedades anisotrópicas [80].

A tensão máxima atinge um valor de 24.87 MPa. Para além da zona onde é aplicada a carga, as zonas que contêm arestas vivas são novamente responsáveis por picos de tensão, para cargas de 1000 N. Com a adição do tensor de orientação das fibras, o campo de tensões muda e surgem algumas regiões novas na peça, onde o valor da tensão aumenta. Estas são ilustradas com cores diferentes na Figura 4.68. O aparecimento das “ilhas” de tensão por toda a peça são uma indicação das propriedades não isotrópicas.

4.7.2. Análise estrutural com influência do processo Mucell®

Os resultados dos valores do deslocamento e dos campos de tensões, considerando a influência do modelo de material anisotrópico, o tensor de orientação de fibras e as diferentes porosidades microcelulares, são apresentadas nas Figura 4.69 e Figura 4.70.

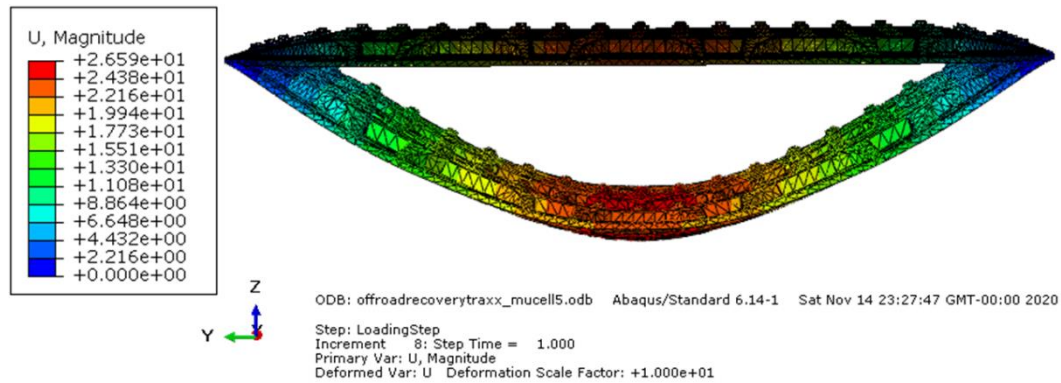


Figura 4.69 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas, com influência do processo Mucell®, com a utilização de 5% em peso de N₂ [80].

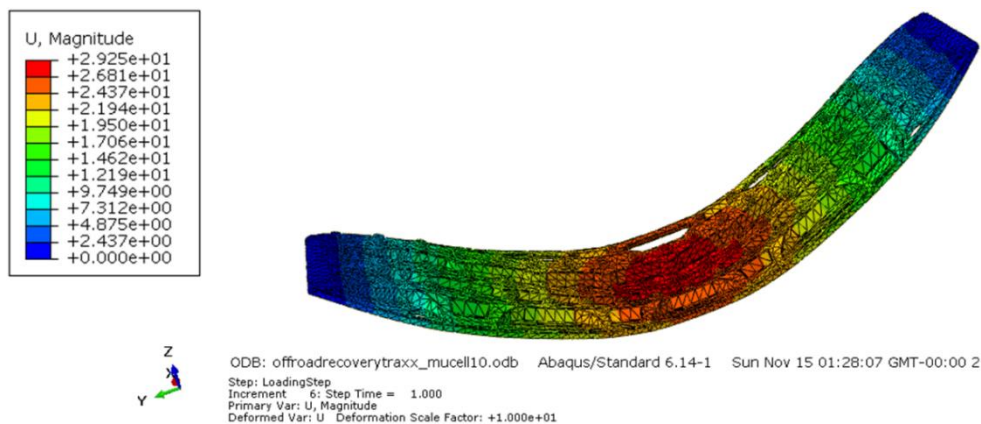


Figura 4.70 - Vetor deslocamento da análise ao modelo estrutural com material com propriedades anisotrópicas, com influência do processo Mucell®, com a utilização de 10% em peso de N₂ [80].

Conforme mostrado nas figuras, o deslocamento máximo estimado no centro da peça de é 26.59 mm por cada 1000 N de força aplicada na peça, no caso do processo Mucell® com a utilização de 5% em peso de N₂, enquanto que para 10% é de 29.25 mm.

Os resultados da análise de tensão crítica *SII* ao longo da peça, são apresentados nas Figura 4.71 e Figura 4.72

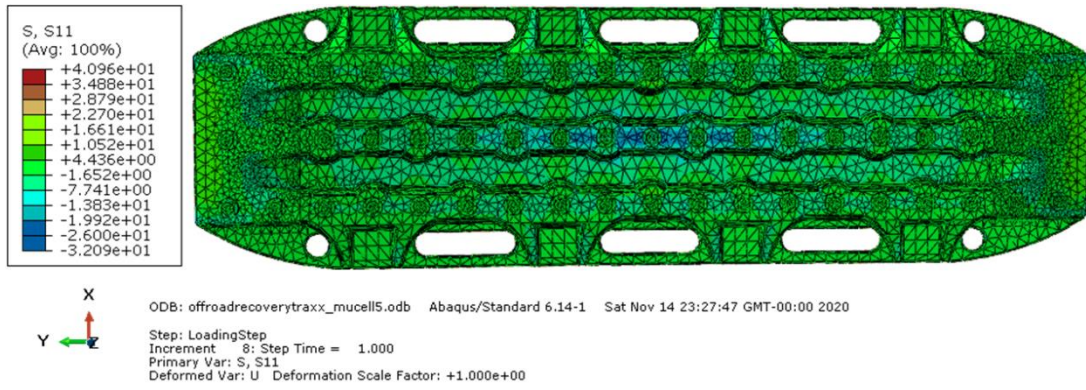


Figura 4.71 - Análise de tensões S_{11} com influência do processo Mucell® e com a utilização de 5% em peso de N_2 [80].

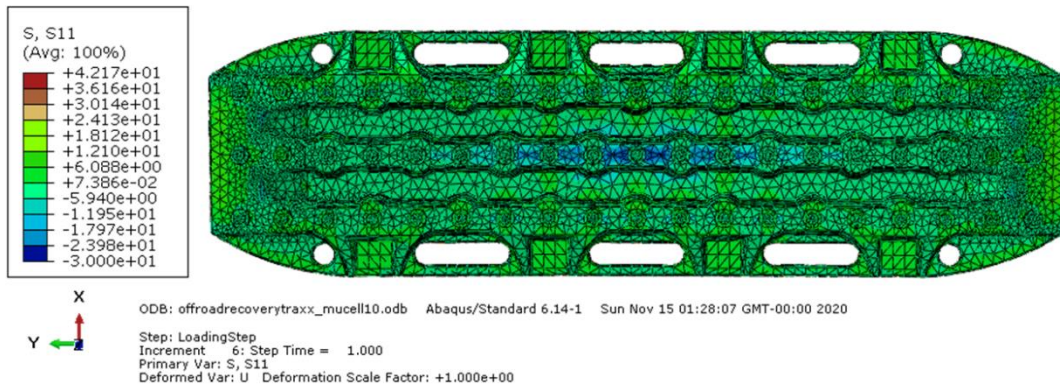


Figura 4.72 - Análise de tensões S_{11} com influência do processo Mucell® e com a utilização de 10% em peso de N_2 [80]

Com a adição da informação da porosidade microcelular os valores da tensão máxima tendem a aumentar. No entanto o campo de tensões muda e o número de zonas da peça onde aparecem esses picos de tensão, é quase nulo, nomeadamente na zona onde é aplicada a carga de 1000 N, conforme ilustra a Figura 4.73.

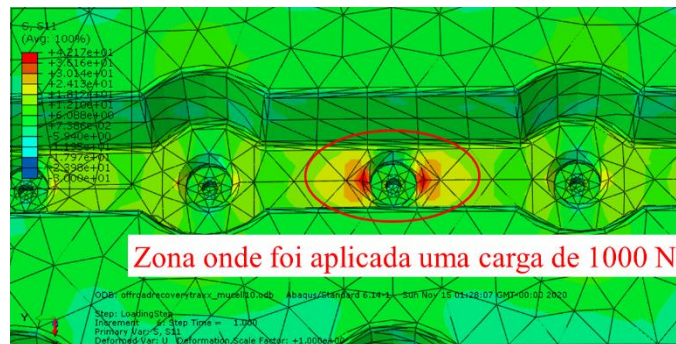


Figura 4.73 - Zonas da peça onde ocorrem os picos máximos de tensão [80].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5. Discussão de resultados

Foram realizadas diversas análises computacionais importantes, envolvendo um grande número de parâmetros fixos e variáveis.

A Tabela 5.1 apresenta uma comparação de tempos de ciclo das três simulações dos processos efetuadas.

Tabela 5.1 - Comparação dos tempos de ciclo das três simulações.

Parâmetro	Convencional	Mucell[®] - 5% N₂	Mucell[®] - 10% N₂
Tempo de enchimento [s]	5	4.8	4.7
Tempo de compactação [s]	35	5	5
Tempo de refrigeração [s]	40	35	35
Tempo de abertura do molde[s]	5		
Tempo total de ciclo [s]	85	49.8	49.7

Os tempos de ciclo reduzem quase para metade no processo Mucell[®]. Analisando os resultados, pode-se observar que os tempos de enchimento vão diminuindo com o aumento do teor de N₂. Este facto confirma uma das vantagens do processo Mucell[®] apontadas na literatura [18, 19, 23, 26].

As simulações também indicaram que as peças com estrutura microcelular porosa, de um modo geral, apresentam uma melhor estabilidade dimensional, do que uma peça moldada pelo processo convencional. O crescimento microcelular do processo Mucell[®] provoca uma compactação uniforme do material a baixa pressão, o que reduz a contração e dá uma melhor estabilidade direcional do que a moldação por injeção convencional. No entanto, é necessário encontrar um compromisso entre essa estabilidade dimensional e redução da massa da peça pretendida, pois tal como mostram os valores da Tabela 5.2, com aumento do teor de gás, não significa que seja atingida uma melhor estabilidade dimensional.

Tabela 5.2 – Diferença de massa entre a peça produzida pelo processo convencional e o processo Mucell®.

Parâmetro	Convencional	Mucell® - 5% N ₂	Mucell® - 10% N ₂
Massa da peça [g]	3196.52	1991.37	1967.67
Deslocamento em x [mm]	3.68	1.81	1.93
Deslocamento em y [mm]	6.18	2.13	3.24
Deslocamento em z [mm]	5.34	3.28	3.80
Deslocamento total [mm]	7.37	4.04	4.57

Na Figura 5.1 é apresentada uma comparação dos valores estimados das marcas de chupados na superfície das peças moldadas por injeção convencional e pelo processo Mucell®. Prevê-se que a tecnologia Mucell® seja uma ferramenta eficaz para reduzir o referido fenómeno significativamente, dado que, como se pode verificar nos resultados, há uma redução significativa destas zonas de um processo para o outro.

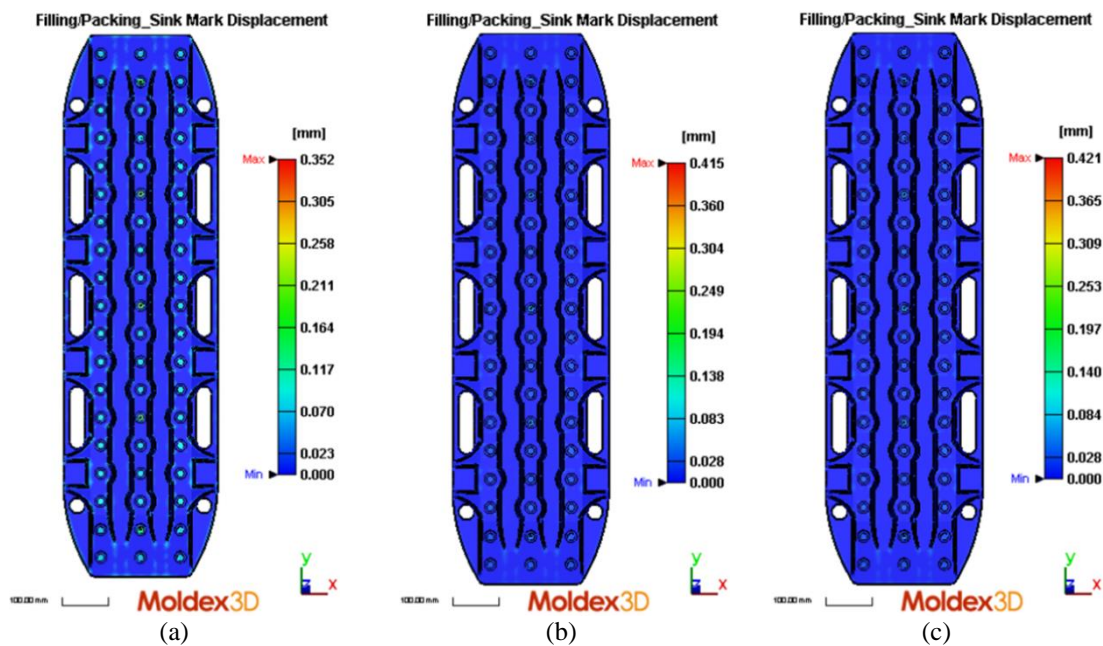


Figura 5.1 - Comparação das zonas e valores estimados das marcas de chupados na superfície da peça. (a) moldagem por injeção convencional, (b) Mucell® – 5% em peso de N₂(c) Mucell® – 10% em peso de N₂

Os valores das pressões de injeção e forças de fecho são apresentados na Tabela 5.3. Uma vez que no processo Mucell® a utilização do gás permite alcançar uma redução da

viscosidade do polímero fundido, isso resulta numa redução do tempo de enchimento. Como efeito, a pressão de injeção é reduzida, levando também a uma redução da força de fecho.

Tabela 5.3 – Comparação dos valores das pressões de injeção e forças de fecho.

Parâmetro	Convencional	Mucell® - 5% N₂	Mucell® - 10% N₂
Tempo de enchimento [s]	5	4.8	4.7
Pressão de injeção máx. [MPa]	17.2	16.36	16.35
Força de fecho máx. [Ton]	428	426	355

Do ponto de vista financeiro, comparando com o processo de injeção convencional, embora o equipamento Mucell® envolva altos custos de investimento, os custos operacionais são significativamente mais baixos. De acordo com o engenheiro Levi Kishbaugh da Trexel Inc., os kits de conversão da tecnologia Mucell® custam, em média, entre 150-300 mil US\$ (125-250 mil EUR€) por máquina de moldação por injeção [101, 102]. A Tabela 5.4, apresenta uma comparação hipotética da economia de custos referentes a material e tempo de ciclo entre o processo Mucell® com utilização de 5% em peso de N₂ e o processo de injeção convencional, abordados neste caso de estudo. Os custos do material e do agente expensor foram obtidos com base na literatura [103, 104].

Tabela 5.4 - Comparação de custos entre o processo de moldação por injeção convencional e o processo Mucell®.

Processo	Convencional	Mucell® - 5% N₂
Número de cavidades	1	1
Massa injetada [kg]	3.2	2.0
Economia de material [%]	-	37.5
Tempo de ciclo [s]	85	50
Otimização de tempo de ciclo [%]	-	43.75
Preço do Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30) [EUR/kg]	3.70	3.70
Custo do material por peça produzida [EUR/peça]	11.84	7.4
Economia de material [EUR/peça]	-	4.44
Proporção de agente expensor em peso [%]	-	5
Custo do agente expensor (N ₂) [EUR/kg]	-	0.3
Custo do agente expensor por peça produzida	-	0.03
Número de peças produzidas por hora	42	72
Número de horas anuais de produção [h]	6000	6000
Número de peças produzidas por ano	252000	432000
Custo anual do agente expensor [EUR]	-	12960
Economia anual de material [EUR]		1918080
Economia total anual [EUR]		1905120

Analisando a Tabela 5.4 conclui-se que, com o processo Mucell® não só a economia do material supera os custos com agente expensor, como também se produz mais a um custo mais baixo. Para além disso, dependendo da aplicação, uma economia de material combinada com uma maior produtividade, normalmente resultam num retorno sobre o investimento no equipamento de adicional Mucell®, num prazo entre seis meses a um ano [39, 103].

Um dos principais problemas da análise da resistência de componentes, é a determinação das propriedades corretas do material. No caso dos materiais compósitos analisados, houve a necessidade de considerar uma composição trifásica, que combina polímero, fibras e a microporosidade, o que compromete a matriz polimérica. Os gráficos com as curvas características tensão-deformação são apresentados na Figura 5.2.

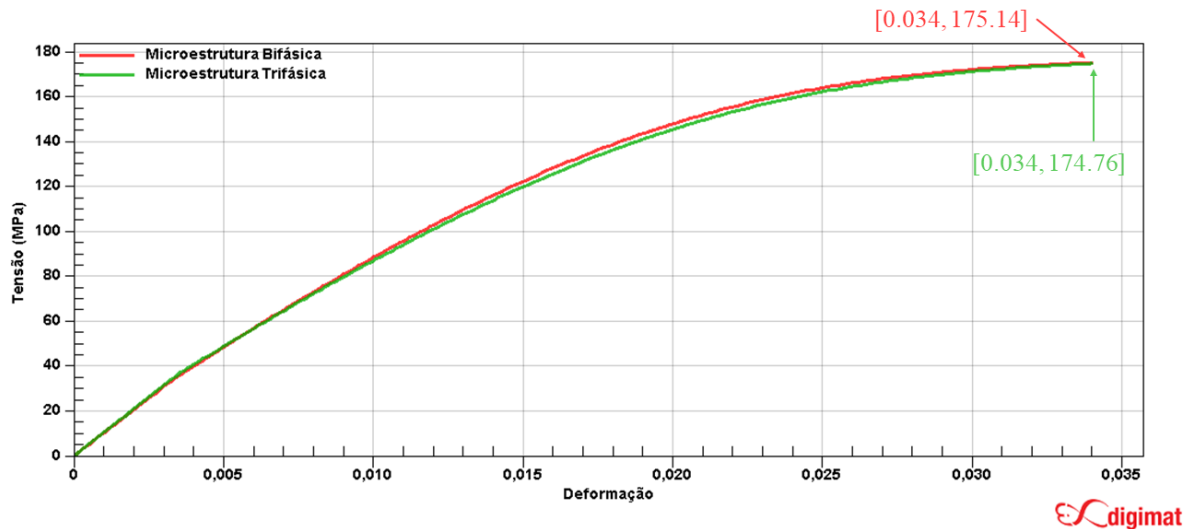


Figura 5.2 - Curvas tensão-deformação dos materiais compósitos, bifásico e trifásico [74].

Analisando os resultados pode-se observar que com a adição de uma estrutural microcelular à peça, ocorre uma deterioração perceptível nas propriedades de resistência mecânica.

Tal como mencionado anteriormente, foram feitas quatro análises estruturais FEA no ABAQUS/CAE:

- simulação estrutural com material com propriedades isotrópicas;
- inclusão do tensor da orientação das fibras para o caso de estudo da influência do processo de injeção convencional na simulação estrutural;
- inclusão do tensor da orientação das fibras e da microporosidade para os dois casos de estudo da influência do processo de injeção Mucell[®] com a utilização de teores de gás N₂ de 5 e 10% em peso.

Para a representação das curvas características da tensão-deformação do comportamento do material no ABAQUS/CAE, foi utilizado o elemento da malha identificado na Figura 5.3, que corresponde ao nó de referência em que está aplicada a carga de 1000 N. Para tal foram extraídos os valores referentes a *U3* e *S3*, que correspondem ao eixo *z*, direção da carga transversal aplicada.

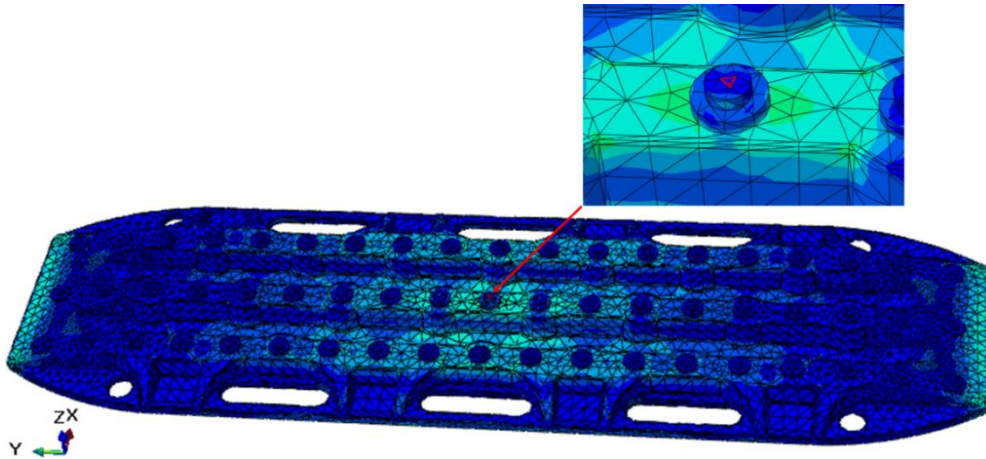


Figura 5.3 - Representação do elemento utilizado para obter os valores da tensão e da deformação [80].

As Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 apresentam as curvas tensão-deformação da peça durante o carregamento de 1000 N para cada um dos quatro casos de estudo simulados.

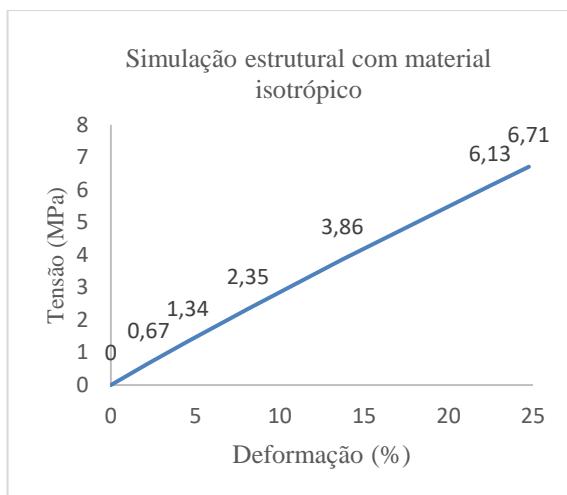


Figura 5.4 - Curva tensão-deformação do material com propriedades isotrópicas.

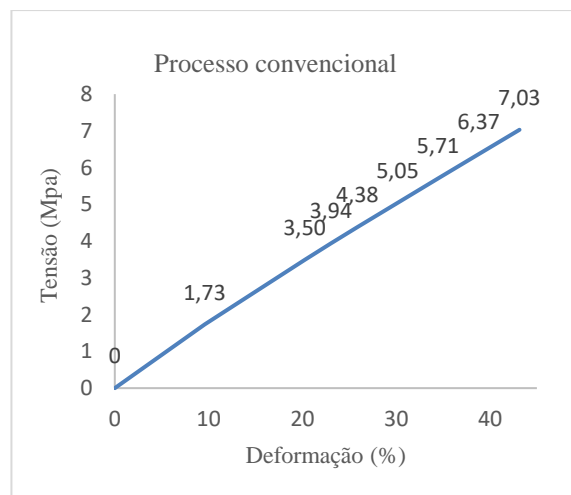


Figura 5.5 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo de injeção convencional.

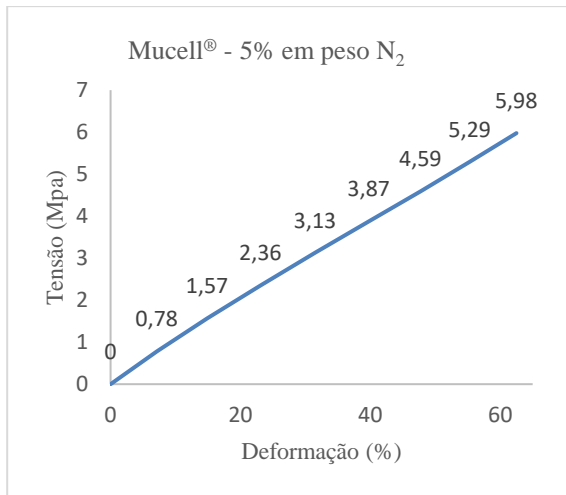


Figura 5.6 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo Mucell® - 5% em peso de N₂.

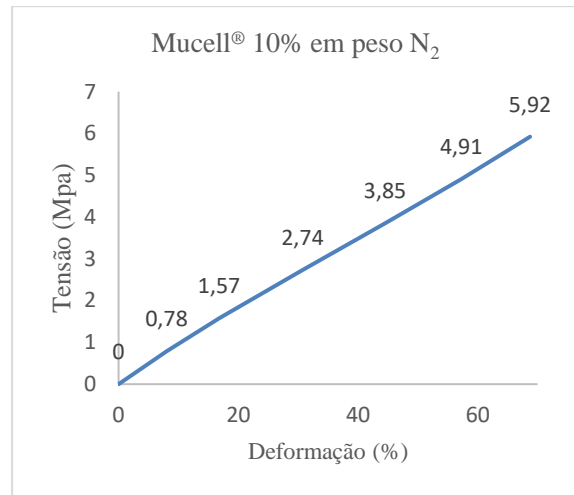


Figura 5.7 - Curva tensão-deformação do material com influência do processo Mucell® - 10% em peso de N₂.

No gráfico da Figura 5.4, referente à análise estrutural FEA sem considerar os efeitos do processo na peça, o material com propriedades isotrópicas obteve as menores deformações. Por outro lado, nos restantes casos de estudo é possível observar uma redução da resistência do material à deformação, principalmente quando é incluída uma estrutura microcelular num produto.

Finalmente, o gráfico da Figura 5.8 apresenta uma comparação das curvas tensão-deformação dos quatro casos analisados. Deste conclui-se que no caso do processo Mucell®, embora os valores máximos de deformação média sejam superiores aos do processo convencional, os valores das tensões residuais na peça são mais baixos.

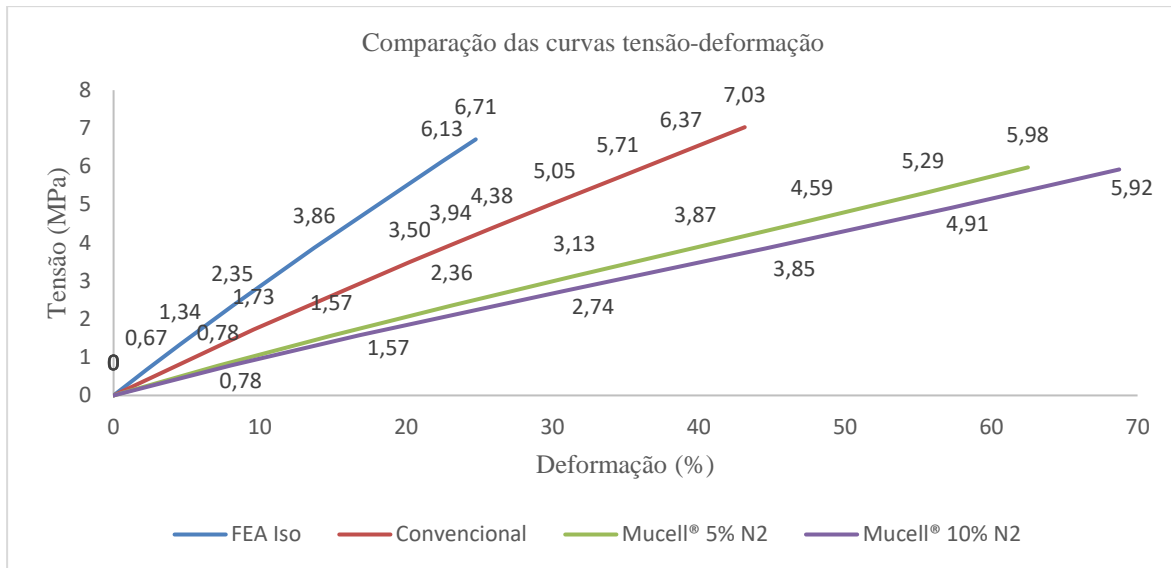


Figura 5.8 - comparação das curvas tensão-deformação dos quatros casos analisados.

Isso mostra que uma análise estrutural FEA considerando apenas a implementação das propriedades do material, não é suficiente para prever dos efeitos do fabrico do componente. Por outro lado, os restantes casos de estudo permitem concluir que a inclusão da influência da simulação do processo de injeção na análise estrutural FEA, aumenta a fiabilidade dos resultados.

6. Conclusões

As investigações efetuadas apresentam a capacidade da simulação numérica 3D de prever o comportamento dinâmico dos processos de moldação por injeção convencional e Mucell[®]. No entanto, para uma aplicação industrial as validações dos resultados da simulação numérica devem sempre ser confirmados com dados experimentais, o que aumenta assim a capacidade de previsão para uma posterior aplicação da simulação do processo em produtos de geometria complexa.

Ficou demonstrado que a obtenção de peças pelo processo de injeção Mucell[®], apresenta diversas vantagens, nomeadamente na produção de peças de grandes dimensões, que permite reduções de massa e de tempos do ciclo de injeção, assim como uma redução da pressão e tempo de compactação, enquanto oferece uma boa estabilidade dimensional. Para além disso, foi possível observar que o desempenho mecânico das peças depende principalmente da redução da densidade pretendida. Assim sendo a quantidade de gás injetado na mistura é o parâmetro de processamento mais influente. As propriedades mecânicas tendem a diminuir consoante a redução de densidade alcançada, ou seja, à medida que a taxa de formação de espuma aumenta, no entanto, isso poderá ser uma vantagem para produtos com características mais flexíveis.

Em relação às vantagens económicas proporcionadas pelo processo Mucell[®], embora não tenham sido apurados valores concretos para o investimento necessário para a aquisição do *setup* de injeção com esta tecnologia, face à forte redução do tempo de ciclo e do material, é expectável um rápido retorno do investimento, mesmo sem contabilizar devidamente os ganhos na conformidade da peça e a redução de custos de operação.

A presente dissertação também permitiu definir uma metodologia para a passagem de informação entre o programa de simulação do processo de moldação por injeção Moldex3D[®] e o programa de análise estrutural FEA ABAQUS/CAE, com auxílio do *software* de modelação de materiais multi-escala Digimat[®]. O estudo das funcionalidades e modelos numéricos associados ao programa Digimat[®], foram essenciais para a avaliar a influência dos processos durante uma análise estrutural FEA com o ABAQUS/CAE. A partir dessas funcionalidades conseguiu-se concluir quais as capacidades de mapeamento presentes no Digimat[®], relativas às variáveis associadas aos elementos da malha, tais como a distribuição

microcelular e orientação das fibras, e que a influência da estrutura microcelular, bem como a orientação das fibras, introduzem um grau mais alto de anisotropia.

Também foram desenvolvidos dois modelos de material não-lineares, de plásticos reforçados com fibras de vidro, tendo em conta que esta é uma incapacidade do *software* de simulação do processo de injeção. Por outro lado, o Digimat® é um *software* complexo, que requer bastante conhecimento e experiência por parte do engenheiro de materiais, mas que se mostrou ser uma ferramenta valiosa para a solução de alguns dos problemas de engenharia presentes na indústria atual.

Finalmente, esta dissertação permitiu criar uma metodologia base para a utilização dos diversos *softwares* de análise de materiais e estrutural que podem ser envolvidos na previsão do comportamento mecânico de uma peça de interesse, possibilitando uma eventual aplicação prática em componentes injetados pelo processo de moldação por injeção. Conclui-se que essa metodologia inicialmente definida, foi uma mais valia para a implementação da mesma.

6.1. Sugestão para desenvolvimento futuro

Considerando este trabalho como base a investigações futuras, seria interessante a aplicação das metodologias aqui criadas em ensaios experimentais, como forma de validação dos resultados das simulações numéricas. Isso irá muito aumentar a capacidade de previsão para uma posterior aplicação industrial.

Para além disso, também seria interessante utilizar esta metodologia para fazer o estudo do comportamento térmico de um componente, como por exemplo a tampa de um motor de automóvel ligeiro de passageiros.

O *software* Digimat® é muito complexo e assim sendo necessita de uma análise em maior detalhe das variáveis associadas ao processo de criação de materiais.

Seria também interessante realizar um estudo económico alargado da utilização do processo Mucell®, como por exemplo custos de aquisição do *setup*, retorno do investimento, ganhos na conformidade da peça e a redução de custos de operação. E eventualmente uma análise do impacto a nível estético nas peças produzidas com recurso a esta tecnologia.

Referências Bibliográficas

- [1] S.-C. Chen, “Introduction to Injection Molding,” *Advanced Injection Molding Technologies*, pp. 1-23, 2019.
- [2] U. Bruder, “Injection-Molding Methods,” *User's Guide to Plastic (Second Edition)*, pp. 110-116, 2019.
- [3] A. Cunha, “Moldação por Injeção e Materiais Plásticos (Vol. 2),” em *Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico*, Marinha Grande, Lapo & Franco - Estúdio Gráfico, Lda., 2003, p. 5.
- [4] T. J. D. Bom, “Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injeção de plásticos,” em *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica*, Técnico - Lisboa, 2014.
- [5] S. Kulkarni, “Injection Molding and Molding Machines,” *Robust Process Development and Scientific Molding (Second Edition)*, p. 109–131, 2017.
- [6] M. Medraj, “Injection Molding - Lecture 16,” 19 Julho 2019. [Online]. Available: <http://users.encs.concordia.ca/~mmedraj/mech421/lecture%2016%20plastics%203.pdf?q=injection-molding>.
- [7] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, “Overview of Plastics Molding,” *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 1-18, 2018.
- [8] U. Bruder, “Different Types of Molds,” *User's Guide to Plastic (Second Edition)*, pp. 81-86, 2019.
- [9] U. Bruder, “Structure of Molds,” em *User's Guide to Plastic (Second Edition)*, 2019, pp. 87-92.
- [10] A. Cunha, “Tipificação de Moldes (Vol. 3),” em *Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico*, Marinha Grande, Lapo & Franco - Estúdio Gráfico, Lda., 2003, pp. 41-66.
- [11] B. R. N. P. M. Nagahanumaiah, “Rapid tooling manufacturability evaluation using fuzzy-AHP methodology,” *International Journal of Production*, 45:5, pp. 1161-1181, 2007.
- [12] E. B. N. R. Tim A. Osswald, “Plastic Processing Technologies,” *Plastics Handbook 5E: The Resource for Plastics Engineers (5th Edition)*, pp. 177-336, 2019.

- [13] U. Bruder, "Polymers and Plastics," *User's Guide to Plastic (Second Edition)*, pp. 1-6, 2019.
- [14] Rapra Technology Limited and ARBURG Limited, "Introduction to Plastics," em *Practical Guide to Injection Moulding - Edited by Vanessa Goodship*, UK, Rapra Technology Limited, 2004, pp. 13-23.
- [15] R.-Y. C. C.-H. (H. Maw-Ling Wang, "Material Properties of Plastics," *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 19-54, 2018.
- [16] L. W. McKeen, "Introduction to Plastics and Polymers," *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers*, pp. 1-20, 2019.
- [17] adhesiveandglue.com, "Thermoplastic - definition, properties and examples of thermoplastic.," adhesiveandglue.com, [Online]. Available: <https://www.adhesiveandglue.com/thermoplastic.html>. [Acedido em 15 01 2020].
- [18] F. J. Martin Rohleder, "Foam Injection Molding," *Specialized Injection Molding Techniques*, pp. 53-106, 2015.
- [19] M. Berry, "Microcellular Injection Molding," *Applied Plastics Engineering Handbook (2nd Edition)*, pp. 203-216, 2017.
- [20] M. Altan, "Thermoplastic Foams: Processing, Manufacturing, and Characterization," *Recent Research in Polymerization*, pp. 117-137, 2018.
- [21] G. Z. Y. G. G. W. X. W. Guiwei Dong, "The Cell Forming Process of Microcellular Injection-Molded Parts," *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1-11, 2014.
- [22] R. C. F. S. R.C.N. Barbosa, "Injection mold design for a plastic component with blowing agent," *Procedia Manufacturing Vol. 17*, pp. 774-782, 2018.
- [23] & I. K. A. Oprea-Kiss, "About the numerous cost and processing advantages of the microcellular foam injection molding process for thermoplastics materials in the automobile industry," *Analecta technica Szegedinensia - Vol. 9. No. 2*, pp. 6-14, 2015.
- [24] T. J. Jacek Nabiałek, "Numerical Modeling of MuCell® Injection Moulding Process," *Advances in Manufacturing II: Volume 4 - Mechanical Engineering*, pp. 434-447, 2019.
- [25] A. K. P. Szych, "Foam Injection Molding: The New Process for Lightweight Foaming," *Kunststoffe international 9/2017*, pp. 46-50, 2017.
- [26] J. H. M. S.-S. M. L. M. J. Gomez-Monterde, "Microcellular injection moulding: A comparison between MuCell process and the novel micro-foaming technology IQ

- Foam,” *Journal of Materials Processing Technology Volume 268*, pp. 162-170, 2019.
- [27] J. M. Andreas Handschke, “Thermoplastic foam injection molding: Physical foaming made very easy,” *Kunststoffe International*, pp. 106-110, 2012.
- [28] J. Z. M. G. P. Haleh Ardebili, “Injection molding,” *Encapsulation Technologies for Electronic Applications (Second Edition)*, pp. 183-194, 2019.
- [29] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, “Gas-/Water-Assisted Injection Molding,” *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 377-400, 2018.
- [30] H.-P. Heim, “Gas- and Fluid-Injection Technique,” *Specialized Injection Molding Techniques*, pp. 107-164, 2015.
- [31] B. E. Obi, “Foaming Processes,” *Polymeric Foams Structure-Property-Performance*, pp. 131-188, 2018.
- [32] P. Portal, “Thermoplastic Foam Injection Molding,” 9 10 2019. [Online]. Available: <https://www.plasticportal.eu/en/thermoplastic-foam-injection-molding/c/2416/>.
- [33] R. M.-M. J. G. G. S. Robert Endlweber, “Small Cells with a Big Effect,” *Kunststoffe 11/2013*, pp. 24-28.
- [34] M. V. J.-F. A. T. S. C. P. e. a. José Antonio Reglero Ruiz, “Polymer foaming with chemical blowing agents: Experiment and modeling.,” *Polymer Engineering and Science*, pp. 2018-2029, 2015.
- [35] Trexel, Inc., “Which polymers are compatible with MuCell®?,” [Online]. Available: <https://trexel.com/contact-us/faq/>. [Acedido em 15 10 2019].
- [36] Trexel, Inc., A GUIDE TO THE MUCCELL® MICROCELLULAR FOAM - T SERIES, 100 Research Drive, Wilmington , USA: Copyright of Trexel, Inc., 2015.
- [37] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, “Foam Injection Molding,” *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 401-423, 2018.
- [38] Trexel, Inc., “CO2 vs N2,” [Online]. Available: <https://trexel.com/co2-vs-n2/>. [Acedido em 16 10 2019].
- [39] Trexel, Inc., “Mucell Microcellular Processing Technology,” 15 08 2019. [Online]. Available: <https://trexel.com/technology-solutions/mucell/>.
- [40] F. I. Amir Sajjad Bahman, “Computer-aided engineering simulations,” *Wide Bandgap Power Semiconductor Packaging*, pp. 199-223, 2018.

- [41] Ø. B. M. S. Carlo Kriesi, “Fast and iterative prototyping for injection molding – a case study of rapidly prototyping,” *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 205-212, 2018.
- [42] C.-T. (. H. Rong-Yeu Chang, “CAE for Advanced Injection Molding Technologies,” *Advanced Injection Molding Technologies*, pp. 235-316, 2016.
- [43] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, “Molding Simulation Methodology,” *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 123-158, 2018.
- [44] R.-Y. C. Chao-Tsai Huang, “Advanced CAE Technology for Microcellular Injection Molding,” *Polymeric Foams - Innovations in Processes, Technologies, and Products*, pp. 363-378, 2016.
- [45] K. Taki, “Experimental and numerical studies on the effects of pressure release rate on number density of bubbles and bubble growth in a polymeric foaming process,” *Chemical Engineering Science, Volume 63, Issue 14*, pp. 3643-3653, 2008.
- [46] J. C. T. L. L. Z. L.-S. T. Zhenhao Xi, “Experiment and simulation of foaming injection molding of polypropylene/nano-calcium carbonate composites by supercritical carbon dioxide,” *Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume 24, Issue 1*, pp. 180-189, 2016.
- [47] Fabien BUCHY, SimpaTec, “Cosmetic surface and lightweighting of plastic parts,” em *Journée technologique de la plasturgie - 5ème Édition*, França, 2016.
- [48] R. V. Johannes Reiner, “Structural Analysis of Composites With Finite Element Codes: An Overview of Commonly Used Computational Methods,” *Comprehensive Composite Materials II Volume 8*, pp. 61-84, 2018.
- [49] A. F. J. George Kretsis, “Conceptual Design of Composite Structures,” *Comprehensive Composite Materials II Volume 8*, pp. 26-46, 2018.
- [50] F. C. S. R. Stephan Wulfinghoff, “Model order reduction of nonlinear homogenization problems using a Hashin-Shtrikman type finite element method,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 330, pp. 149-179, 2018.
- [51] S. Torquato, “What Is a Heterogeneous Material?,” em *Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties*, New York, Springer Science & Business Media, 2005, pp. 1-3.
- [52] A. S. C. V. R. d. B. M.V. Cid Alfaro, “Numerical homogenization of cracking processes in thin fibre-epoxy layers,” *European Journal of Mechanics A/Solids*, p. 119–131, 2009.

- [53] M.-J. P. Zhelong He, “Locally exact asymptotic homogenization of periodic materials under anti-plane shear loading,” *European Journal of Mechanics / A Solids* 81, 2020.
- [54] D. L. M. C. A. Yvette Anna Orban, “Study of methods for simulating multiphase construction materials,” *Procedia Manufacturing*, nº 22, p. 256–261, 2018.
- [55] D. P. Sajad Arabnejad, “Mechanical properties of lattice materials via asymptotic homogenization and comparison with alternative homogenization methods,” *International Journal of Mechanical Sciences* 77, p. 249–262, 2013.
- [56] C. S. A. Erik Andreassen, “How to determine composite material properties using numerical homogenization,” *Computational Materials Science*, pp. 488-495, 2013.
- [57] A. E. M. T. K. S. M. A. I. Y. Djebara, “Modeling of the effect of particles size, particles distribution and particles number on properties of polymer-clay nanocomposites: numerical homogenization versus experimental results,” *Composites Part B: Engineering, Volume 86*, pp. 135-142, 2016.
- [58] G. D. F. W. S. S. & H. B. Weihong Zhang, “Using strain energy-based prediction of effective elastic properties in topology optimization of material microstructures,” *Acta Mechanica Sinica volume 23*, p. 77–89, 2007.
- [59] S. S. Z. M. Masoud Tahani, “Multiscale asymptotic homogenization analysis of epoxy-based composites reinforced with different hexagonal nanosheets,” *Composite Structures* 222, 2019.
- [60] G. K. W. Ogierman, “Mean field homogenization in multiscale modelling of composite materials,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 61, Issue 2*, pp. 343-348, 2013.
- [61] G. K. W. Ogierman, “Mean field homogenization in multiscale modelling of composite materials,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 61, nº 2, pp. 343-348, 2013.
- [62] Y. Benveniste, “A new approach to the application of Mori-Tanaka’s theory in composite materials,” *Mechanics of Materials* 6, pp. 147-157, 1987.
- [63] MAXTRAX Pty Ltd, “MKII RECOVERY TRACKS,” 2020. [Online]. Available: <https://www.maxtrax.com.au/product-cat/maxtrax/>. [Acedido em 28 09 2020].
- [64] Siemens NX.
- [65] L. W. McKeen, “Polyamides (Nylons),” *Film Properties of Plastics and Elastomers (Fourth Edition)*, pp. 187-227, 2017.

- [66] B. L. DEOPURA, "Polyamide fibers," *Polyesters and Polyamides*, pp. 41-61, 2008.
- [67] E. A. Campo, "Mechanical Properties of Polymeric Materials," *Selection of Polymeric Materials - How to Select Design Properties from Different Standards*, pp. 41-101, 2008.
- [68] Ensinger, "TECAMID 66 GF30 black," [ensingerplastics.com](https://www.ensingerplastics.com), 2020. [Online]. Available: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/products/pa66-tecamid-66-gf30-black>. [Acedido em 2020 10 10].
- [69] A. M. Korsunsky, "Chapter 2 - Elastic and Inelastic Deformation and Residual Stress," *A Teaching Essay on Residual Stresses and Eigenstrains*, pp. 5-20, 2017.
- [70] CoreTech System Co., Ltd., Moldex3D®, 2020.
- [71] CoreTech System Co., Ltd., Moldex3D R17 Help, 2020.
- [72] Dassault Systèmes, "3DEXPERIENCE Edu," Dassault Systèmes SE, 2020. [Online]. Available: <https://edu.3ds.com/en>. [Acedido em 10 09 2020].
- [73] e-Xstream engineering, "Digimat - User's Manual 2019.0".
- [74] e-Xstream engineering, "Digimat".
- [75] N. B. G. G. D. B. Joseph Fitoussi, "Prediction of the anisotropic damaged behavior of composite materials: introduction of multilocal failure criteria in a micro-macro relationship," *Computational Materials Science Volume 5, Issues 1-3*, pp. 87-100, 1996.
- [76] D.-J. H. Wai-Fah Chen, "Chapter 4 - Stress-Strain Relations for Perfectly Plastic Materials," em *Plasticity for Structural Engineers [Reprint ed.]*, J Ross Publishing Classics, 2007, pp. 179-230.
- [77] E. Pedro, "STRUCTURAL ANALYSIS OF INJECTION MOLDED COMPONENTS USING DIGIMAT AS AN INTERFACE SOFTWARE," *Instituto Superior Técnico*, 2017.
- [78] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, "Part and Mold Design," *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 55-85, 2018.
- [79] G. B. W. F. J. G. K.-H. Pahl, *Engineering Design: A Systematic Approach - Third Edition*, 3, 2007.
- [80] Dassault Systèmes®, ABAQUS®, 2020.

- [81] G. Dhondt, “Ten-node tetrahedral element (C3D10 and F3D10),” 02 03 2014. [Online]. Available: http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node33.html. [Acedido em 11 10 2020].
- [82] A. Cunha, “Sistema de Alimentação e Escapes de Gases (Vol.6),” em *Manual do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico*, Marinha Grande, Lapo & Franco - Estúdio Gráfico, Lda., 2003.
- [83] V. Goodship, ARBURG Practical Guide to Injection Moulding, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK: Smithers Rapra Press, 2004.
- [84] Synventive Moulding Solutions, “Hot Runner Guide - Layout and Design,” 2020. [Online]. Available: <https://www.synventive.com/Products/Default2.aspx?id=2147483982>. [Acedido em Maio 2020].
- [85] J. A. Brydson, “Plastics Materials (Seventh Edition),” *Principles of the Processing of Plastics*, pp. 158-183, 1999.
- [86] J. M. Fischer, “Causes of Molded-Part Variation: Part Design,” *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warp*age (Second Edition), pp. 19-24, 2013.
- [87] CoreTech System Co., Ltd., “Tips for BLM Mesh Generation in Designer,” *Moldex3D R17 Help*, 2020.
- [88] G. J. G. R. Wiesław Frącz, “Selected aspects of manufacturing and strength evaluation of porous composites based on numerical simulations,” *Scientific Letters of University of Rzeszow Technology - Mechanics*, pp. 31-43, 2017.
- [89] Autodesk Inc., “Selecting a Transient cool analysis (Procedure),” Autodesk Inc., 2020. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-6009B4EE-091D-4A0F-8BBF-2CFC7CF202D2-htm.html>. [Acedido em 25 10 2020].
- [90] F. G. Xi Chen, “A study of packing profile on injection molded part quality,” *Materials Science and Engineering: A, Volume 358, Issues 1–2*, pp. 205-213, 2003.
- [91] R.-Y. C. C.-H. (. H. Maw-Ling Wang, “Process Conditions,” *Molding Simulation: Theory and Practice*, pp. 87-121, 2018.
- [92] ALBIS, “PA6 and PA66 - What's the Difference?,” ALBIS Distribution GmbH & Co. KG, 2020. [Online]. Available: <https://www.albis.com/dam/jcr:8d76ea1b-fad7->

4dc0-91ec-79c9b4223062/PA6%20vs%20PA66_Chart_ALBIS%20PLASTIC%20GmbH.pdf. [Acedido em 2020 10 10].

- [93] R. I. Borja, “J2 Plasticity,” em *Plasticity - Modeling & Computation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 31-58.
- [94] B. L. Y.-W. M. Shao-Yun Fu, *Science and Engineering of Short Fibre-Reinforced Polymer Composites (Second Edition)*, 2019.
- [95] D. H. T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials (Third Edition)*, Cambridge University Press, 2019.
- [96] J. Thomason, “Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass reinforced polyamide 6,6,” *Composites Science and Technology, Volume 61, Issue 14*, pp. 2007-2016, 2001.
- [97] D. H. A. R. T. Young W. Kwon, *Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures*, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [98] M. I. El Ghezal e I. Doghri, “Micromechanical Modeling of Porous Solids,” *Poromechanics V*, pp. 1736-1745, 2013.
- [99] H. N. S. G. F. R. Abderrahmane Ayadia, “Determination of orthotropic properties of glass fibre reinforced thermoplastics using X-ray tomography and multiscale finite element computation,” *Composite Structures, Volume 136*, pp. 635-649, 2016.
- [100] Dassault Systèmes, “Abaqus 6.14 Online Documentation,” 2014. [Online]. Available: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/>. [Acedido em 07 09 2020].
- [101] Trexel, Inc., “MuCell® Physical Foaming Technology,” 13 01 2020. [Online]. Available: <https://trexel.com/technology-solutions/mucell/>.
- [102] T. Toy, “How Mucell® microcellular foaming technology for injection molding makes things stronger and lighter,” 04 04 2011. [Online]. Available: <https://tommytoy.typepad.com/tommy-toy-pbt-consultin/2011/04/how-mucell-microcellular-foaming-technology-for-injection-molding-could-make-things-stronger-and-lig.html>. [Acedido em 2020 01 13].
- [103] J. M. A. Handschke, “Thermoplastic foam injection molding: Physical foaming made very easy,” *Kunststoffe*, p. 151–156, 2012.
- [104] Alibaba.com, “BASF ULTRAMID A3EG6 BLACK 00564 - Reference Price,” 11 11 2020. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/BASF-ULTRAMID-A3EG6-BLACK-00564-high_60650129034.html.

- [105] E. B. N. R. Tim A. Osswald, “Introduction,” *Plastics Handbook 5E: The Resource for Plastics Engineers (5th Edition)*, pp. 13-44, 2019.
- [106] CoreTech System Co., Ltd. (Moldex3D), “Why Foam Injection Molding Simulation?,” 12 11 2019. [Online]. Available: <https://www.moldex3d.com/en/products/software/moldex3d/solution-add-on/foam-injection-molding/>.
- [107] Z. Z. C. C. G. L. Q. L. Eric Li, “Numerical homogenization for incompressible materials using selective smoothed finite element method,” *Composite Structures*, Vol. 123, pp. 216-232, 2015.
- [108] W. Y. Zheng Ye, “New Approach to Bounding Effective Properties of Random Heterogeneous Materials,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.*, vol. 51, n° 2, pp. 426-432, 2013.
- [109] J. D.-d.-O. J. P.-d.-C. A. A.-C. B. Barroqueiro, “Practical implementation of asymptotic expansion homogenisation in thermoelasticity using a commercial simulation software,” *Composite Structures*, 2016.
- [110] F. M.-l. Dong Ji-wei, “Asymptotic expansion homogenization for simulating progressive damage of 3D braided composites,” *Composite Structures* 92, p. 873–882, 2010.
- [111] K. K. T. R. R. N. Peter W Chung, “Asymptotic expansion homogenization for heterogeneous media: computational issues and applications,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Volume 32, Issue 9*, pp. 1291-1301, 2001.
- [112] J. D. N. S. Y. Prawoto, “Re-visiting the ‘rule of mixture’ used in materials with multiple constituting phases: A technical note on morphological considerations in austenite case study,” *Computational Materials Science* 65, p. 528–535, 2012.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo I – Patente Maxxtraxx



(12) **United States Patent**
McCarthy

(10) **Patent No.:** **US 8,231,066 B2**
(45) **Date of Patent:** **Jul. 31, 2012**

(54) **VEHICLE RECOVERY AND TRACTION LADDER**

(75) Inventor: **Bradley John McCarthy**, Northgate (AU)

(73) Assignee: **Paula Rachel Lange and Julie-Anne McCarthy** (AU)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 481 days.

(21) Appl. No.: **12/065,118**

(22) PCT Filed: **Oct. 13, 2006**

(86) PCT No.: **PCT/AU2006/001516**

§ 371 (c)(1), (2), (4) Date: **Feb. 28, 2008**

(87) PCT Pub. No.: **WO2007/041802**

PCT Pub. Date: **Apr. 19, 2007**

(65) **Prior Publication Data**
US 2008/0217077 A1 Sep. 11, 2008

(30) **Foreign Application Priority Data**
Oct. 14, 2005 (AU) 2005905683

(51) **Int. Cl.**
E01B 23/00 (2006.01)
(52) **U.S. Cl.** **238/14**
(58) **Field of Classification Search** **238/14,**
238/10 R, 11
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,640,459 A	2/1972	Preisler	
4,210,280 A *	7/1980	Reisner	238/14
4,993,768 A *	2/1991	Ewen	294/51
5,439,171 A	8/1995	Fruend	
5,486,027 A *	1/1996	Dionne et al.	294/51
5,538,183 A *	7/1996	McGee	238/14
6,394,362 B1 *	5/2002	Kramm	238/14
6,779,738 B1 *	8/2004	Stannard	238/14
6,933,036 B2 *	8/2005	Whitaker	428/141

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

CA 2137486 6/1996

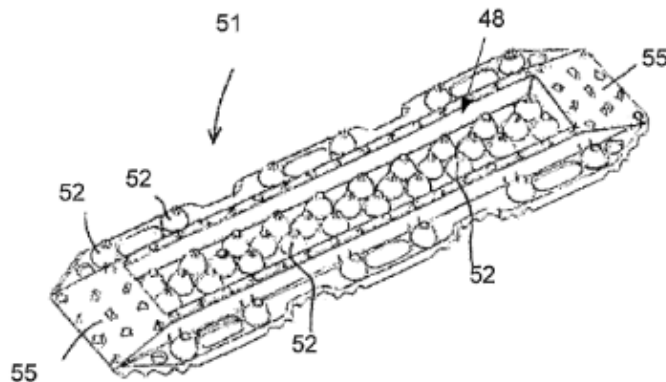
* cited by examiner

Primary Examiner — S. Joseph Morano
Assistant Examiner — R. J. McCarry, Jr.
(74) *Attorney, Agent, or Firm* — Galbreath Law Offices, P.C.; John A. Galbreath

(57) **ABSTRACT**

A lightweight vehicle ladder for the recovery and traction of vehicles includes a central recessed portion (48) bordered by longitudinal strengthening ribs (56) and ramps (55) at either end. A plurality of traction members (52), each of which terminates in an upper tire engagement member (54) are disposed within the recessed portion and thereby somewhat protected from the ingress of mud during use in order that traction may be maintained. The underside and topside of the vehicle are formed with complementary shapes in order that a number of the ladders may be stacked one on top of the other to form a laminate of increased strength for application with particularly heavy vehicles.

15 Claims, 4 Drawing Sheets

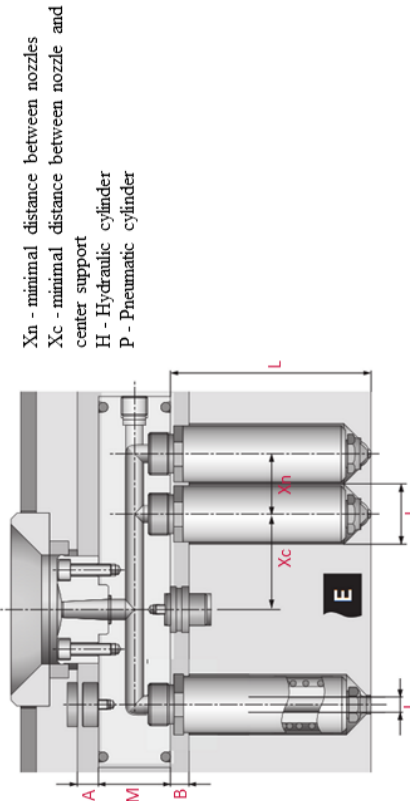


Anexo II – Tabela Synventive

Nozzle Series	Shot Weight per nozzle (gr)										Dimensions (mm)												
	Open					Valve-Gate					J	L	D	H	Xn (H)	Xn (F)	Xc (H)	Needle	Optional ø I	Manifold (Δ)	Gate Height		
	High ^(a)	Medium ^(b)	Low ^(c)	High ^(a)	Medium ^(b)	Low ^(c)																	
S	06 S	30	70	120	-	-	Ø 6	60...200	Ø 20	Ø 6	-	-	Ø 3	5	-	-	-	-	-	-	-		
	09 S	70	120	250	-	-	Ø 9	60...400	Ø 27	Ø 6	-	-	Ø 3.8	-	-	-	-	-	-	-	-		
	12 S	500	800	1500	80	150	Ø 12	48...297	Ø 35	Ø 6	-	-	Ø 6	8; 10; 14	-	-	-	-	-	-	-		
	16 S	1000	1500	2500	250	600	Ø 16	96...697	Ø 50	Ø 6	-	-	Ø 6	18	-	-	-	-	-	-	-	< 15	
E	06 E01	30	70	120	10	45	Ø 6	60...200	Ø 20	Ø 1.2...2	37	57	35,5	5	37	37	37	37	37	37	37	37	
	09 E01	70	120	250	40	80	Ø 9	60...400	Ø 27	Ø 1.5...2.5	37	57	40	-	42	40	40	40	40	40	40	42	
	12 E01	500	800	1500	100	250	Ø 12	96...627	Ø 35	Ø 4	57	86	62	-	50/55	62	62	62	62	62	62	50/55	
	16 E01	1000	1500	2500	500	800	Ø 16	96...627	Ø 50	Ø 5	57	86	62	18	55/65	62	62	62	62	62	62	62	55/65
	16 E02	700	1000	2000	100	200	Ø 16/12	196...647	Ø 50/40	Ø 4	57	86	62	-	55/65	62	62	62	62	62	62	62	55/65
	22 E01	1500	2500	5000	800	1200	Ø 22	96...627	Ø 60	Ø 6	63	86	62	20; -24	65	62	62	62	62	62	62	62	65
	22 E02	1200	2000	3500	300	800	Ø 22/18	196...647	Ø 60/50	Ø 5	63	86	62	Ø 8	65	62	62	62	62	62	62	62	65

Viscosity of melt (at medium melt temperature and at a shear rate of 1000 1/s)

- a) high PC, PMMA, PEEK, PES, PSU, PEI, POM
- b) medium ABS, SAN, ASA, PBT, PET, POM (Copo), PA, PPE, PPO, PPS, PC/ABS, PC/PBT
- c) low PP, PE, PS, LCP, TPE



Anexo III – Ficha técnica do Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30

CAMPUS® Datasheet

Ultramid® A3EG6 - PA66-GF30
BASF



Product Texts

Glass fibre reinforced injection moulding grade for machinery components and housings of high stiffness and dimensional stability such as lamp socket housings, cooling fans, insulating profile for aluminium window frames, water containers for automotive cooling systems, as well as electrically insulating parts.

Rheological properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Melt volume-flow rate, MVR	30 / *	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperature	275 / *	°C	ISO 1133
Load	5 / *	kg	ISO 1133
Molding shrinkage, parallel	0.5 / *	%	ISO 294-4, 2577
Molding shrinkage, normal	1.0 / *	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Tensile modulus	10000 / 7200	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	190 / 130	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	3 / 5	%	ISO 527-1/-2
Tensile creep modulus, 1000h	* / 5300	MPa	ISO 899-1
Charpy impact strength, +23°C	85 / 100	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	70 / 70	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, +23°C	11 / 20	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30°C	10 / 9.5	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermal properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10°C/min	260 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load, 1.80 MPa	250 / *	°C	ISO 75-1/-2
Temp. of deflection under load, 0.45 MPa	260 / *	°C	ISO 75-1/-2
Vicat softening temperature, 50°C/h 50N	250 / *	°C	ISO 306
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	28 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	88 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Burning Behav. at 1.5 mm nom. thickn.	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested (1.5)	1.6 / *	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card available	Yes / *	-	-
Burning Behav. at thickness h	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested (h)	0.8 / *	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card available	Yes / *	-	-
Oxygen index	24 / *	%	ISO 4589-1/-2
Electrical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Relative permittivity, 100Hz	4.2 / 9.7	-	IEC 62631-2-1
Relative permittivity, 1MHz	3.7 / 4.3	-	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 100Hz	120 / 1530	E-4	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 1MHz	210 / 810	E-4	IEC 62631-2-1
Volume resistivity	1E13 / 1E10	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Surface resistivity	* / 1E10	Ohm	IEC 62631-3-2
Electric strength	40 / 37	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index	- / 550	-	IEC 60112
Other properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Water absorption	5.5 / *	%	Sim. to ISO 62