



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

**Processamento e Caracterização de Placas processadas com
Tecnologia MuCell®**

Mariana Catarino Febra

Leiria, *Março* de 2015



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

**Processamento e Caracterização de Placas processadas com
Tecnologia MuCell®**

Mariana Catarino Febra

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Março* de 2015

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Leiria para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

ISBN: (número)

© Instituto Politécnico de Leiria

Ao meu marido, Tiago Miguel Marques Febra
À minha família

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela por me proporcionar ao desenvolvimento deste trabalho, pelo apoio prestado na preparação e análise dos ensaios realizados e, também, constante atenção na orientação da dissertação.

A todos os que com o seu apoio, compreensão e estímulo, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

As peças processadas por injeção com recurso à tecnologia *MuCell*® têm aplicação importante no fabrico de componentes em material polimérico, para as diferentes áreas indústrias. O processamento de peças plásticas com esta tecnologia permite utilizar diferentes materiais plásticos no fabrico de peças e, podem apresentar um conjunto de vantagens tais como: diminuição do ciclo de moldação por injeção, redução de empenos das peças processadas, obtenção de peças plásticas mais leves e com geometrias relativamente complexas.

Com a realização deste trabalho de dissertação pretendeu-se otimizar e caracterizar as propriedades mecânicas de um conjunto de diferentes materiais processados com distintas percentagens de gás. Consequentemente, no âmbito deste trabalho, foi desenvolvido e fabricado um molde de injeção para ser utilizado numa máquina de injeção equipada com a tecnologia *MuCell*®. Os materiais obtidos por esta tecnologia foram caracterizados em termos físicos e mecânicos.

Foi observada uma natural diminuição da densidade dos materiais estudados (PP, PPTL e ABS) com injeção de gás. A análise fotográfica das seções transversais das placas processadas, com diferentes percentagens de azoto, permitiu observar que a existência do gás é naturalmente responsável pela diminuição das propriedades mecânicas.

Foram realizados ensaios estáticos de flexão em 3 pontos e obtidos os valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade para os diferentes materiais processados. Nos provetes analisados observou-se uma natural diminuição das propriedades mecânicas com o aumento da percentagem de azoto.

Foi, também possível observar que a orientação do fluxo de injeção no processamento das placas (transversal e longitudinal), tem uma natural influência nas propriedades mecânicas. Os resultados das propriedades mecânicas obtidos, na direção transversal, são inferiores às da direção longitudinal.

Foram, também, obtidas as curvas de variação da rigidez versus temperatura para vários materiais processados. Com o aumento da percentagem de gás (e com o aumento da temperatura) foi possível observar uma diminuição da rigidez para todos os materiais processados com e sem gás.

A análise das curvas de *storage modulus* e *tan delta* versus temperatura (ensaios DMA) permitem estabelecer as temperaturas de serviço a utilizar com os componentes processados por injeção com a tecnologia *MuCell*®.

Palavras-chave

Moldes; processamento por injeção; polímeros; azoto; tecnologia MuCell®; caracterização mecânica e física.

Abstract

The plastic parts injected by *MuCell*® technology have a big important application on polymeric components, in different kind of industries. The processing of the plastics parts with this technology allows different polymers and give us many advantages, as: decrease the injection cycle, decrease the parts warpage, allows lighter parts and permit to inject complex geometries.

With the realization of this dissertation, it demonstrated the optimization and characterization of the mechanical proprieties of different materials set with altered percentage of gas. In parallel, was developed an injection plastic tool adapted to *MuCell*® process to use on the injection machine with this technology. On the materials obtained with this technology were characterized physically and mechanically.

With the introducing of the gas, on study materials (PP, PPTL and ABS), was detected one natural decrease on the density of the material. On the photography analyses, to the transversal section of each material, with different percentage of nitrogen, was analyzed that the gas has a big influence on the mechanical proprieties.

It were made static testes of 3 points flexion, obtaining the values of the maximal strain and the modulus of elasticity for the different materials. In these try-outs was verified a natural decrease of the mechanical proprieties with the increase of the gas.

The orientation of the flow (perpendicular and parallel) has also influence on the mechanical proprieties. These proprieties obtained on the parts with perpendicular flow are worse than on the parts with parallel flow.

It were created different curve with the variation of the strain versus temperature to the different materials, where was verified that with the increase of the gas (and with the increase of the temperature) the storage modulus of all the processed decrease.

Analyzing the storage modulus and tan delta versus temperature (DMA) curves, allow us to establish the operating temperature on the components, injected with the *MuCell*® technology.

Keywords

Injection tools; injection process; polymer; nitrogen; MuCell® technology; mechanical and physic characteristics.

Índice

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ESTRUTURA	2
CAPÍTULO 2	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 PROCESSAMENTO POR INJEÇÃO DE PEÇAS PLÁSTICAS	5
2.1.1 <i>Processo de Injeção</i>	5
2.1.2 <i>Molde para injeção de plásticos</i>	8
2.2 INJEÇÃO COM AGENTES EXPANSORES FÍSICOS - SISTEMA <i>MUCCELL® MICROCELLULAR PROCESS TECHNOLOGY</i>	10
2.2.1 <i>Processo de fabrico e seus componentes</i>	11
2.2.2 <i>Vantagens Vs. Desvantagens</i>	19
2.2.3 <i>Influência da geometria e processos de trabalho de um molde para MuCell®</i>	20
2.2.4 <i>Aplicações</i>	24
2.3 MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO COM EXPANSORES QUÍMICOS.....	27
2.3.1 <i>Injeção a baixa pressão</i>	27
2.3.2 <i>Injeção a alta pressão</i>	28
2.4 PARÂMETROS INFLUENTES NA MOLDAÇÃO DE INJEÇÃO COM AGENTES EXPANSORES.....	29
2.4.1 <i>Velocidade de injeção</i>	29
2.4.2 <i>Espessura da peça</i>	30
2.4.3 <i>Temperatura do molde</i>	31
2.4.4 <i>Temperatura de injeção</i>	31
2.4.5 <i>Contrapressão</i>	31
2.5 ESPUMAS MICROCELULAR.....	32
2.5.1 <i>Espumas Poliméricas</i>	32

2.5.2	<i>Espuma microcelular de nano-compósito de PP com sílica e injeção de Azoto</i>	35
2.6	MATERIAIS DE ESTUDO.....	36
2.6.1	<i>PP Natural</i>	36
2.6.2	<i>PP com Talco</i>	39
2.6.3	<i>ABS</i>	41
2.6.4	<i>Gás de Azoto (Nitrogénio), N2</i>	42
CAPÍTULO 3	.....	43
3.	PROJETO E FABRICO DO MOLDE DE INJEÇÃO DE PLACAS EM MATERIAL POLIMÉRICO . 43	
3.1	ESTUDO PRELIMINAR.....	44
3.2	3D DO MOLDE.....	45
3.3	PRODUÇÃO DO MOLDE.....	49
CAPÍTULO 4	.....	55
4.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	55
4.1	PROCESSAMENTO DE PLACAS POR INJEÇÃO COM RECURSO À TECNOLOGIA MUCCELL®.....	55
4.1.1	<i>Injeção das placas em material polimérico (ABS, PP e PPTL) com gás (azoto)</i>	55
4.1.2	<i>Preparação dos provetes</i>	63
4.2	ENSAIOS MECÂNICOS.....	65
4.2.1	<i>Ensaio estático de flexão em três pontos</i>	65
4.2.2	<i>Ensaio de DMA (Dynamic Mechanical Analysis)</i>	66
4.3	CÁLCULO DA DENSIDADE.....	68
CAPÍTULO 5	.....	69
5.	RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	69
5.1	ANÁLISE ESTRUTURAL DAS PLACAS INJETADAS COM A TECNOLOGIA MUCCELL®	70
5.2	DENSIDADES	71
5.3	ENSAIOS ESTÁTICOS EM FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	72
5.4	ENSAIOS DMA.....	86
CAPÍTULO 6	.....	89
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	89
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	91
CAPÍTULO 7	.....	93
7.	BIBLIOGRAFIA	93

Lista de Figura

FIGURA 0-1: CICLO DE MOLDAÇÃO [2].	6
FIGURA 0-2: CHAPAS PRINCIPAIS DE UM MOLDE PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS [3].	9
FIGURA 0-3: MÓDULO DE INJEÇÃO PREPARADO PARA MUCELL® [1].	10
FIGURA 0-4: CONTROLADOR DO FLUXO SCF [1].	11
FIGURA 0-5: PROCESSO DO FLUXO A INJETAR DE SOLUÇÃO DE FASE SINGULAR [1].	12
FIGURA 0-6: CP DO SCF, PELA RELAÇÃO ENTRE A PRESSÃO E TEMPERATURA [1].	13
FIGURA 0-7: PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO FLUXO SCF [11].	14
FIGURA 0-8: CONTROLADOR DE FLUXO SCF DESCRIMINADO [11].	15
FIGURA 0-9: CONTROLADOR DE FLUXO SCF DESCRIMINADO [11].	15
FIGURA 0-10: CONTROLADOR DE FLUXO SCF DESCRIMINADO [11].	16
FIGURA 0-11: REGULADOR DE PRESSÃO ADAPTADO À UNIDADE DE INJEÇÃO [11].	16
FIGURA 0-12: INJETOR DE FLUXO SCF.	17
FIGURA 0-13: VÁLVULA DE RETENÇÃO DE BOLHAS DA VÁLVULA ANTIRRETORNO [11].	18
FIGURA 0-14: FILETES DE MARCHA OPOSTA DA HASTE DA VÁLVULA ANTIRRETORNO [11].	18
FIGURA 0-15: ZONA DE PASSAGEM DO FUSO DE INJEÇÃO [11].	18
FIGURA 0-16: ZONA DE MISTURA DO FUSO DE INJEÇÃO [11].	19
FIGURA 0-17: SISTEMA DE INJEÇÃO MUCELL® [18].	19
FIGURA 0-18: COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO DE INJEÇÃO CONVENCIONAL E O PROCESSO DE INJEÇÃO MUCELL® [18].	20
FIGURA 0-19: CASOS DE ESTUDO: IMPLANTES OBTIDOS COM TECNOLOGIA MUCELL® [10].	21
FIGURA 0-20: ESTRUTURA POROSA DA MOLDAÇÃO APÓS UMA INJEÇÃO A 30MM/S [10].	22
FIGURA 0-21: DIFERENÇA DA POROSIDADE SEGUNDO A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE [10].	22
FIGURA 0-22: DIÂMETRO DOS POROS VERSUS VELOCIDADE INJEÇÃO [10].	22
FIGURA 0-23: DIFERENÇA DO TAMANHO DAS CONEXÕES DOS POROS SEGUNDO A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE [10].	23
FIGURA 0-24: POROSIDADE MÁXIMA VERSUS PARÂMETROS DE PROCESSO [10].	23
FIGURA 0-25: TAMANHOS DE PORO VERSUS PARÂMETROS DE PROCESSO [10].	24
FIGURA 0-26: MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS COM RECURSO AO SISTEMA MUCELL® [18].	25
FIGURA 0-27: MOLDAÇÃO DE INJEÇÃO COM EXPANSORES QUÍMICOS A BAIXA-PRESSÃO [20].	28

FIGURA 0-28: MOLDAÇÃO DE INJEÇÃO COM EXPANSORES QUÍMICOS A ALTA-PRESSÃO [20].	28
FIGURA 0-29: EFEITO DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO E DIMENSÕES CELULARES (A: 50 MM/S ; B: 300 MM/S) [20].	30
FIGURA 0-30: INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NAS DIMENSÕES CELULARES [23] (A: 7 MM; B: 5 MM) [20].	31
FIGURA 0-31: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DE UMA ESPUMA POLIMÉRICA DE CÉLULA ABERTA (A) E UMA ESPUMA POLIMÉRICA DE CÉLULA FECHADA (B) [21].	32
FIGURA 0-32: FORMAÇÃO DE CÉLULAS E CRESCIMENTO CELULAR DE UM POLÍMERO FUNDIDO.	34
FIGURA 0-33: ESTRUTURA CELULAR DE ESPUMA DE NANO-COMPÓSITO DE PP COM SÍLICA, COM A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE SÍLICA [34].	36
FIGURA 0-34: ESQUEMA DE REFINAÇÃO DO PETRÓLEO [41].	37
FIGURA 0-35: TEXTURA LAMINAR DO TALCO [43].	39
FIGURA 0-36: ESTRUTURA MOLECULAR DO ABS.	41
FIGURA 0-1: DIAGRAMA DE GANTT RELATIVO AO PLANO DE FABRICO DO MOLDE.	44
FIGURA 0-2: ESTUDO PRELIMINAR DO MOLDE PARA EXECUÇÃO DOS PROVETES.	45
FIGURA 0-3: 3D DO MOLDE PARA A INJEÇÃO DAS PLACAS, VISTA DO LADO DA INJEÇÃO.	46
FIGURA 0-4: 3D DO MOLDE PARA A INJEÇÃO DAS PLACAS, VISTA DO LADO DA CAVIDADE.	46
FIGURA 0-5: 3D DO MOLDE: BUCHA.	47
FIGURA 0-6: 3D DO MOLDE: CAVIDADE.	47
FIGURA 0-7: VISTA EM CORTE: MOLDE PARA O PROCESSAMENTO DAS PLACAS.	48
FIGURA 0-8: PORMENOR DE VERSÕES PARA OS CANAIS DE INJEÇÃO DO MOLDE PARA PRODUÇÃO DAS PLACAS.	48
FIGURA 0-9: PORMENOR DE VERSÕES PARA OS CANAIS DE INJEÇÃO DO MOLDE PARA PRODUÇÃO DAS PLACAS.	49
FIGURA 0-10: GALGAMENTO DE UMA PEÇA EM AÇO.	50
FIGURA 0-11: DESBASTE DE UMA PEÇA EM AÇO.	50
FIGURA 0-12: FURAÇÃO DE UMA PEÇA EM AÇO.	50
FIGURA 0-13: RETIFICAÇÃO DE UMA PEÇA EM AÇO.	51
FIGURA 0-14: ACABAMENTO DE UMA PEÇA EM AÇO.	51
FIGURA 0-15: EROÇÃO DE UMA PEÇA EM AÇO.	51
FIGURA 0-16: CONTROLO DIMENSIONAL DE UMA PEÇA EM AÇO.	52
FIGURA 0-17: POSTIÇOS DE ZONAS MOLDANTES DA BUCHA, EM AÇO 1.2738, PARA MOLDE DE INJEÇÃO DAS PLACAS.	52
FIGURA 0-18: CHAPA DE FIXAÇÃO DOS ELEMENTOS MOLDANTES.	53
FIGURA 0-19: CAVIDADE DO MOLDE DE INJEÇÃO (PARTE FIXA DO MOLDE).	53
FIGURA 0-20: POSTIÇO MONTADO NA ZONA MÓVEL DO MOLDE.	54
FIGURA 0-1: MÁQUINA DE INJEÇÃO SANDRETTO MEGA 610T.	55
FIGURA 0-2: MÁQUINA DE INJEÇÃO SANDRETTO MEGA 610T.	56
FIGURA 0-3: PRODUÇÃO PLACAS EM ABS COM GÁS (4 PLACAS).	56
FIGURA 0-4: PRIMEIRA VERSÃO DO MOLDE.	57
FIGURA 0-5: SEGUNDA VERSÃO DO MOLDE.	57
FIGURA 0-6: TERCEIRA VERSÃO DO MOLDE.	58

FIGURA 0-7: GEOMETRIA DOS PROVETES EM MM PARA: A) ENSAIOS EM DMA EM FLEXÃO 3 PONTOS; B) ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS (E ESQUEMA DE CARREGAMENTO); C) DIREÇÃO DE INJEÇÃO (SENTIDO PARALELO (=)); D) DIREÇÃO DE INJEÇÃO (SENTIDO PERPENDICULAR (⊥)).	63
FIGURA 0-8: MARCAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS PROVETES.	64
FIGURA 0-9: APLICAÇÃO DE CARGA À PLACA PARA SE OBTER O PROVETE.	64
FIGURA 0-10: IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES.	64
FIGURA 0-11: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CARREGAMENTO EM FLEXÃO EM 3 PONTOS.	65
FIGURA 0-12: MÁQUINA ELETROMECÂNICA UTILIZADA NOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.	66
FIGURA 0-13: MÓDULOS DE OPERAÇÃO DE UM CONJUNTO DMA A) COMPRESSÃO; B) FADIGA; C) OSCILAÇÃO COM CARGA ESTÁTICA; D) TRAÇÃO E E) FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.	67
FIGURA 0-14: EQUIPAMENTO DMA UTILIZADO NOS ESTUDOS, PARA ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS.	67
FIGURA 0-15: BALANÇA DE PRECISÃO ELETRÔNICA PARA CÁLCULO DE DENSIDADES.	68
FIGURA 0-1: FOTO REPRESENTATIVA DA SEÇÃO DE UMA AMOSTRA PROCESSADA POR INJEÇÃO COM À TECNOLOGIA <i>MuCELL</i> ®.	70
FIGURA 0-2: VALORES DE DENSIDADE DOS DIFERENTES MATERIAIS ESTUDADOS VERSUS PERCENTAGEM DE GÁS.	71
FIGURA 0-3: RESULTADOS DE TENSÃO PARA PROVETES EM PP PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	74
FIGURA 0-4: FOTOS RELATIVAS ÀS SEÇÕES DE FRATURA DOS PROVETES EM PP COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE GÁS (0,5% E 1%) E DIFERENTES ESPESSURAS (2 E 4 MM).	75
FIGURA 0-5: RESULTADOS DE TENSÃO PARA PROVETES EM PP COM TALCO PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	76
FIGURA 0-6: FOTOS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS PROVETES DO PPTL COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE GÁS (0,5% E 1%) E DIFERENTES ESPESSURAS (2 E 4 MM).	77
FIGURA 0-7: RESULTADOS DE TENSÃO PARA PROVETES EM ABS COM TALCO PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	78
FIGURA 0-8: FOTOS RELATIVAS ÀS SUPERFÍCIES DE FRATURA DOS PROVETES DO ABS COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE GÁS (0,5% E 1%) E DIFERENTES ESPESSURAS (2 E 4 MM).	79
FIGURA 0-9: RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDOS PARA PROVETES EM PP PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	80
FIGURA 0-10: RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDOS PARA PROVETES EM PP COM TALCO PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	80
FIGURA 0-11: RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDOS PARA PROVETES EM ABS PROCESSADOS COM E SEM GÁS.	81
FIGURA 0-12: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS SEM ADIÇÃO DE GÁS.	82
FIGURA 0-13: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE POLIPROPILENO PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=2MM.	83
FIGURA 0-14: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE POLIPROPILENO PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=4MM.	83
FIGURA 0-15: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE POLIPROPILENO COM TALCO (PPTL) PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1%) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=2MM.	84

FIGURA 0-16: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE POLIPROPILENO COM TALCO (PPTL) PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1%) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=4MM.	85
FIGURA 0-17: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTURENO, ABS PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1%) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=2MM.	85
FIGURA 0-18: CURVAS TÍPICAS DE TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS DE ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTURENO, ABS PROCESSADOS COM E SEM GÁS (0, 0.5, 1%) NA DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL, COM H=4MM.	86
NA FIGURA SEGUINTE, FIGURA 0-19, PODE-SE AVALIAR A RIGIDEZ DOS VÁRIOS MATERIAIS PROCESSADOS (ABS, PP E PPTL; COM E SEM GÁS) COM O AUMENTO DA TEMPERATURA (GAMA ENTRE 20 E 100 °C). COM O AUMENTO DA PERCENTAGEM DE GÁS (E COM O AUMENTO DA TEMPERATURA) PODE-SE OBSERVAR UMA DIMINUIÇÃO DA RIGIDEZ (<i>STORAGE MODULUS</i>) NA GAMA DE TEMPERATURAS CONSIDERADAS NO ENSAIO DE DMA EM FLEXÃO EM 3 PONTOS. A PARTIR DA ANÁLISE DAS CURVAS DE VARIAÇÃO DO MÓDULO EM FLEXÃO EM TRÊS PONTOS (<i>STORAGE MODULUS</i>) QUE OS MATERIAIS POLIMÉRICOS ABS PROCESSADOS COM GÁS (0.6 E 1%) APRESENTAM DE RIGIDEZ MAIORES NA GAMA DE TEMPERATURAS ENTRE OS 78 E 90 °C. NO CASO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS PP E PPTL PODE-SE OBSERVAR UMA LIGEIRA DIMINUIÇÃO DOS VALORES DE RIGIDEZ NOS MATERIAIS PROCESSADOS COM GÁS, NA GAMA DE TEMPERATURAS DE ENSAIO CONSIDERADAS. OS MATERIAIS PP APRESENTAM TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO VÍTREA (T _g) INFERIORES À TEMPERATURA AMBIENTE O QUE EXPLICA O ANDAMENTO DAS CURVAS DE VARIAÇÃO DE RIGIDEZ OBTIDAS. NO CASO DO ABS PROCESSADO SEM GÁS, A T _g É DE 80 °C, OBTIDA A PARTIR DAS CURVAS DE TAN DELTA DOS ENSAIOS DE DMA. ...	86
FIGURA 5-20: CURVAS DE VARIAÇÃO <i>STORAGE MODULUS</i> VERSUS TEMPERATURAS PARA OS VÁRIOS MATERIAIS PROCESSADOS (ABS, PP E PPTL), COM E SEM GÁS.	87

Lista de Tabelas

TABELA 0-1: FASES DO CICLO DA MOLDAÇÃO [2].....	6
TABELA 0-2: T _c E P _c PARA O CP DOS GASES N ₂ E CO ₂ [1].	13
TABELA 0-3: APLICAÇÕES DO PROCESSO <i>MUCCELL</i> [®] [19].....	25
TABELA 0-4: PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A MOLDAÇÃO DE PEÇAS PROCESSADAS POR INJEÇÃO COM <i>MUCCELL</i> [®] :.....	29
TABELA 0-5: PROPRIEDADES DO PP [42].....	37
TABELA 0-6: CLASSIFICAÇÃO DOS TRÊS TIPOS DE POLIPROPILENO [36, 37].....	38
TABELA 0-7: PROPRIEDADES FÍSICAS DE PP PURO E PP COM TALCO, TESTADO A 23°C [43, 44].....	40
TABELA 0-8: PROPRIEDADES DO ABS [42].....	41
TABELA 0-1: MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO POR INJEÇÃO.	56
TABELA 0-2: DATAS DE PROCESSAMENTO DAS PLACAS COM DIFERENTES MATERIAIS E DIFERENTES PERCENTAGENS DE GÁS. ...	56
TABELA 0-3: PARÂMETROS DE INJEÇÃO.	61
TABELA 0-1: RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS REALIZADOS COM OS DIFERENTES MATERIAIS PROCESSADOS POR INJEÇÃO SEM E COM GÁS (TECNOLOGIA <i>MUCCELL</i> [®]).	72

NOMENCULATURA

ABS – *Acrilonitrila Butadieno Estireno*
ADPC – *Automatic Delivery Pressure Controller*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CFC – Cloro-flúor-carbono
CP – Ponto crítico
DIM – *Deutsche Industrie Norm*
DMA – *Dynamic Mechanical Analysis*
DP – Desvio de padrão
D_P – Pressão de difusão
D_T – Temperatura de difusão
ISBN – *International Standard Book Number*
IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*
MFE – *Mass Flow Element*
MPP – *MuCell® Process Pressure*
MIT – *Massachusetts Institute of Technology*
P_C – Pressão crítica
PP – Polipropileno
PPTL – Polipropileno com talco
SCF – *Super Critical Fluid*
T_C – Temperatura crítica
TPU – Poliuretano
USD – US Dollar
UV – Ultra Violeta
x̄ – Média

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Os materiais estudados e analisados nesta dissertação são materiais poliméricos (PP, PPTL e ABS) com adição de gás. Estes materiais foram processados por injeção com recurso à tecnologia *MuCell*®, o que permitiu obter peças injetadas com menor densidade que os obtidos sem injeção de gás.

O processo de injeção em que se utiliza a tecnologia de *MuCell*®, permite obter peças plásticas com o gás no seu interior (Azoto ou Dióxido de Carbono), obtendo-se deste modo peças finais com o interior poroso [1].

O fabrico de moldes de injeção, bem como o processamento e a caracterização dos materiais produzidos, são áreas extremamente importantes na obtenção de componentes técnicos específicos para as diferentes indústrias, nomeadamente a automóvel e a da aviação. O processamento por injeção, com recurso à tecnologia *MuCell*®, permite obter materiais mais leves para aplicações específicas. Consequentemente, é importante otimizar o processo, bem como, caracterizar os materiais processados com diferentes percentagens de gás.

1.2 Objetivos

No presente trabalho pretende-se estudar e caracterizar materiais polímeros, nomeadamente o polipropileno, o polipropileno com talco e o acrilonitrila-butadieno-estireno, processados por injeção com Azoto, adquirindo-se materiais com uma estrutura microcelular de Azoto. A tecnologia de injeção *MuCell*® é uma tecnologia recente e, consequentemente, não existe muito trabalho científico de caracterização

mecânica de materiais poliméricos processados por esta tecnologia. Assim, neste trabalho, pretende-se processar e caracterizar um conjunto de materiais poliméricos com Azoto. Em suma os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Projetar e fabricar um molde para injeção de placas com diferentes materiais plásticos (PP, PPTL e ABS com e sem azoto, N₂) com recurso à tecnologia *MuCell*®;
- Processar e otimizar os parâmetros de processamento por injeção com azoto, das diferentes placas a processar com diferentes materiais termoplásticos;
- Obter provetes por corte, a partir das placas em material polimérico (PP, PPTL e ABS com e sem azoto, N₂) a processar, para realizar ensaios de DMA e ensaios estáticos em flexão em três pontos;
- Determinar as densidades dos materiais poliméricos processados (PP, PPTL e ABS com e sem azoto, N₂);
- Determinar as propriedades mecânicas dos materiais a processar (PP, PPTL e ABS com e sem azoto, N₂) em duas direções (perpendicular e paralela ao fluxo de injeção):

Ensaio estático: Tensão ($\sigma_{flexão}$) e módulo em flexão em 3 pontos ($E_{flexão}$);

Ensaio de DMA: módulo em flexão em 3 pontos ($E_{flexão}$);

1.3 Estrutura

Esta dissertação é dividida por seis capítulos apresentados resumidamente nos seguintes parágrafos.

CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica

Na revisão bibliográfica são apresentados diversos temas importantes ao desenvolvimento do estudo nomeadamente:

- Processamento por injeção de peças plásticas – processo de injeção e molde para injeção de plásticos;
- Injeção com agentes expansores físicos (Sistema *MuCell*®) – processo de fabrico e seus componentes, vantagens vs. Desvantagens, influência da geometria e processos de trabalho de um molde para *MuCell*® e aplicações;
- Moldação por injeção com expansores químicos – injeção a baixa pressão e a alta pressão;
- Parâmetros influentes na moldação de injeção com agentes expansores – velocidade de injeção, espessura da peça, temperatura do molde, temperatura de injeção e contrapressão;
- Espumas microcelulares – espumas poliméricas e espuma microcelular de nano-compósitos de PP com sílica e injeção de Azoto;

- Materiais de estudo – PP, PPTL, ABS e Azoto.

CAPÍTULO 3 – Projeto e fabrico do molde de injeção de placas em material polimérico

No capítulo 3 é apresentado o projeto de desenvolvimento e fabrico do molde (estudo preliminar e moldação 3D) para ser utilizado no processamento por injeção de placas em material polimérico (utilizando a tecnologia *MuCell*®). As placas obtidas, vão ser utilizadas na caraterização física e mecânica dos materiais processados com diferentes percentagens de gás.

CAPÍTULO 4 – Procedimentos experimentais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais, bem como, os equipamentos utilizados no processamento por injeção e caraterização mecânica e física dos materiais processados:

- Processamento por injeção com recursos à tecnologia *MuCell*® de placas em material polimérico (ABS, PP e PPTL) com injeção de gás (Azoto);
- Preparação dos provetes a utilizar nos vários ensaios mecânicos;
- Ensaios mecânicos: ensaios de flexão em três pontos e ensaios de DMA;
- Cálculo da densidade dos vários materiais processados.

CAPÍTULO 5 – Resultados e análise de resultados

Os resultados obtidos e sua análise são apresentados neste capítulo:

- Análise estrutural das placas injetadas com a tecnologia *MuCell*®;
- Resultados relativos à densidade dos materiais processados;
- Resultados relativos às propriedades mecânicas em flexão em três pontos;
- Resultados de variação da rigidez com a temperatura (ensaios de DMA).

CAPÍTULO 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, bem como os trabalhos propostos a realizar no futuro.

CAPÍTULO 7 – Bibliografia

Por fim, neste capítulo, são apresentadas todas as referências consideradas no desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Processamento por injeção de peças plásticas

2.1.1 Processo de Injeção

O processo de moldação por injeção é um processo cíclico, caracterizado por um conjunto de operações designado por ciclo de moldação. É um dos principais métodos para produção de peças plásticas, peças que podem ser complexas e que devem ter, também, uma elevada cadência. Este processo tem uma enorme importância nas diferentes áreas industriais, nomeadamente embalagem, construção civil, automóvel, material elétrico e eletrónico. Uma das suas dificuldades reside na espessura da parede da peça plástica a processar, que geralmente não deve exceder alguns milímetros, de forma a permitir a desmoldação da peça [2].

Neste processo podem ser moldados por injeção, peças em material termoplástico, com a adição ou não de aditivos e, também, podem ser adicionadas fibras curtas ou partículas [3].

O ciclo de moldação de injeção de peças plásticas distribui-se em oito fases conforme se pode observar na Figura 2-3 e na Tabela 2-1.

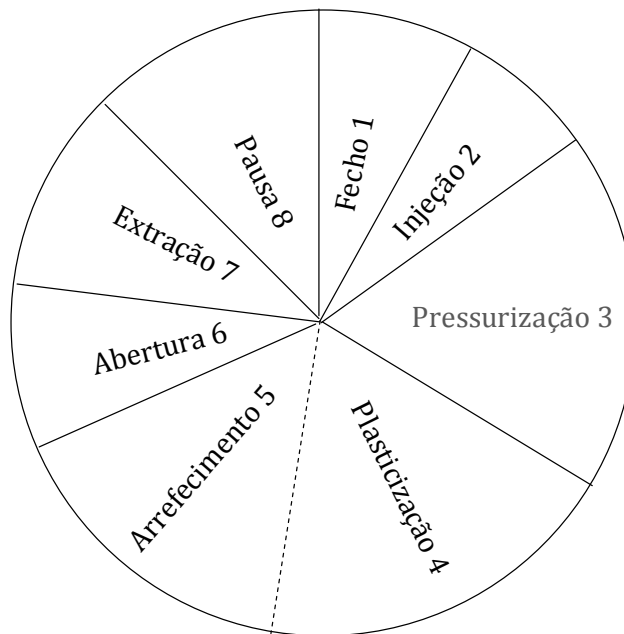


Figura 2-1: Ciclo de moldação [2].

Tabela 2-1: Fases do ciclo da moldação [2].

Fase	Esquema	Designação
1		Molde fecha.
2		Fuso avança e com o pistão injeta o fundido para dentro do molde.
3		Parafuso pressuriza a moldação de modo a compensar a contração da peça.
4		Parafuso recua (com movimento de rotação), plasticizando o material para a injeção seguinte.
5		Arrefecimento, até que a peça possa ser extraída sem distorção.
6		Molde abre.
7		A peça é extraída (por ação dos extratores do sistema mecânico de extração do molde).
8		Tempo de pausa.

Fase 1 – Fecho e Trancamento

Esta operação corresponde ao início do ciclo (quer o funcionamento seja em regime automático ou semiautomático) e deve ser tão rápida quanto possível. No entanto, existem limitações às velocidades a utilizar para o fecho do molde resultantes de [4]:

- Inércia das grandes massas metálicas do conjunto do molde;
- Necessidade de encosto suave das duas partes do molde para evitar a danificação das superfícies de justamento;
- Eventuais movimentos internos no molde, que se desenvolvam simultaneamente com o avanço do molde.

O tempo para esta operação depende da performance da máquina de injeção, das características do molde e a distância a percorrer. A sua otimização implica a minimização do intervalo de abertura entre as metades dos moldes (ajustado ao valor mínimo necessário para possibilitar a ejeção da moldação) e o ajuste criterioso das velocidades de fecho utilizadas [4].

Fase 2 – Injeção

A fase de injeção é garantida pelo avanço linear do fuso que, como um êmbolo, força o material fundido a entrar no molde [4]. A injeção inicia-se após o cilindro de plasticização ter encostado o bico do cilindro ao injetor do molde, e deverá terminar quando a moldação estiver preenchida a 95% do respetivo volume [4]. A velocidade de injeção selecionada deve corresponder a um compromisso entre celeridade e a qualidade do produto final (velocidades muito elevadas podem gerar marcas na superfície, efeitos de jato ou sobreaquecimentos da matéria-prima) [4]. Consequentemente, para cada moldação deverá existir um ajuste de velocidade ótimo, correspondente à situação em que as especificações do produto final são garantidas com um nível mínimo da pressão de injeção [4]. Caudais de injeção de 100 a 500 cm³/s são prática comum no processamento por injeção [4].

Fase 3 – Pressurização

A seguir ao enchimento do molde, é necessário continuar a pressurizar a moldação, a fim de reduzir o efeito da contração por arrefecimento e evitar o refluxo do fundido. No entanto, a pressurização não deve ser excessiva porquanto advir danos à peça (p. ex. desenvolvimento de tensões internas) e dificultar a sua extração. Esta fase termina assim que a entrada do material nas zonas moldantes, ou a própria peça, estejam suficientemente arrefecidos para inibir o fluxo de material [4].

Fase 4 e 5 – Plasticização e Arrefecimento

Assim que ocorre a consolidação do ataque, o parafuso de plasticização pode começar a rodar iniciando a plasticização de material para o ciclo seguinte. Durante este processo, o fuso é obrigado a recuar por efeito da pressão criada pelo material que se vai depositando na sua frente, logo que o volume desejado esteja doseado o fuso deixa de injetar material. Enquanto isso a peça vai arrefecendo no interior do molde [4]. A fase de arrefecimento termina assim que a peça atinja uma temperatura que permita a desmoldação sem distorção da peça plástica. Esta fase do ciclo é uma operação de troca de calor transportada pelo material, dependendo da espessura da moldação e do projeto do molde, nomeadamente no que refere ao seu sistema de refrigeração. Velocidades de arrefecimento lento permitem reduzir as tensões internas criadas pelo arrefecimento, mas correspondem a aumentos significativos do tempo de ciclo [4].

Fase 6 e 7 – Abertura e extração

O tempo para esta operação varia consoante a máquina utilizada, pois cada máquina tem diferentes características de unidade de fecho. O curso de abertura do molde e os movimentos desta ferramenta necessários para garantir a extração de moldação serão também variáveis de molde para molde. A extração sucede sempre posteriormente à abertura do molde [4].

Fase 8 – Tempo de pausa (tempo morto)

O tempo de pausa decorre entre o fim da extração e o início do novo ciclo. Atualmente é desejável que esse tempo seja nulo, ou muito próximo disso, o que deverá acontecer em situações de funcionamento em regime automático. No entanto, pode ser prolongado nos casos em que a remoção da peça seja manual ou tenha que ser feita a colocação de insertos. Pela sua própria natureza, o tempo morto depende da aptidão do operador, do nível de automatização do molde e do tipo de afinação utilizada. Os tempos mortos prolongados e com variação do ciclo para ciclo afetam drasticamente a reprodutibilidade do processo [4].

2.1.2 Molde para injeção de plásticos

Um molde de injeção pode ser entendido como um conjunto de sistemas funcionais que permitem um espaço (zona moldante) onde a peça vai ser materializada, definido pela cavidade e pela bucha, espaço esse preenchido por

plástico fundido em condições controladas, por sistemas que garantem a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas [3, 5]. Por sua vez o molde é o sistema funcional da máquina de injeção diretamente associado a um produto. Dependendo das peças a produzir, o molde a fabricar pode ser mais ou menos complexo. Este por sua vez deverá produzir peças de qualidade, num tempo de ciclo o mais curto possível, aumentando, deste modo, a cadência de produção. Deve ser projetado e fabricado para ter o mínimo de manutenção durante o tempo de serviço e satisfazer algumas funções imprescindíveis ao seu bom funcionamento como [3]:

- Definir corretamente o(s) volume(s) e forma da(s) peça(s) injetadas, assegurando a reprodutibilidade dimensional, de ciclo para ciclo;
- Facilitar o arrefecimento do polímero;
- Promover uma extração eficaz da(s) peça(s).

A constituição de um molde segue o princípio típico de montagem de placas de aço numa determinada sequência, com o objetivo de se obter a estrutura básica de um molde de injeção. Os componentes de um molde são diversos, no entanto existem determinadas chapas essenciais para a sua constituição denominadas na seguinte Figura 2-2:

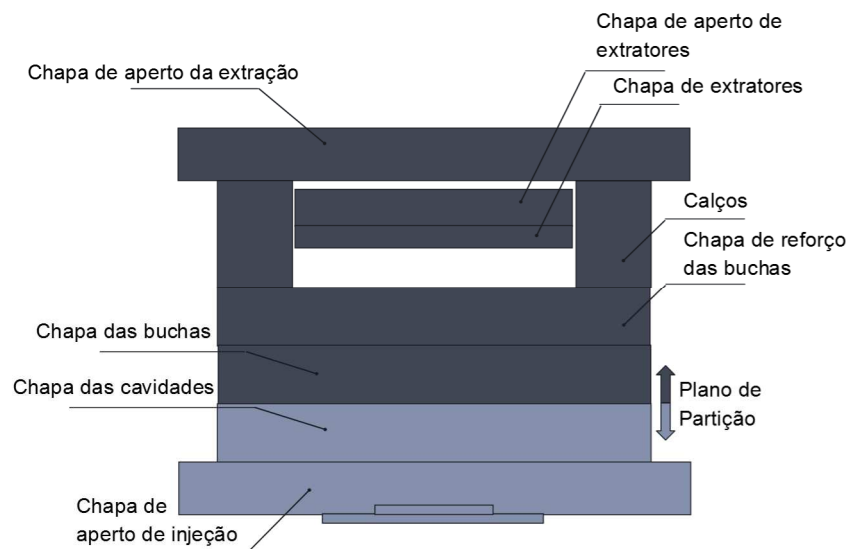


Figura 2-2: Chapas principais de um molde para injeção de plásticos [3].

Esta por sua vez pode ser dividida por duas zonas: a zona fixa (de injeção) e móvel (de extração). A zona de injeção representada na figura a cinza claro, é onde está inserida, por norma, a cavidade do molde, zona essa da qual o fluxo do material plástico procedente da máquina de injeção flui para a(s) cavidade(s) do molde. Estas definem a forma da peça, o tamanho e a sua superfície [6]. Já a zona a cinza escuro, a bucha, é fixa geralmente constituída pelo sistema de extração do molde que irá permitir a extração da peça, de forma uniforme e com a mínima força possível para

que esta não seja danificada, e confere também a forma e superfície da peça [6]. Para além do sistema de injeção e do sistema de extração também o sistema de refrigeração é importante, pois controla a temperatura das superfícies do molde de modo a facilitar a solidificação da peça, sistema este, indispensável aos moldes com canais quentes [6].

2.2 Injeção com agentes expansores físicos - Sistema *MuCell® Microcellular Process Technology*

A espuma microcelular, que dá origem ao sistema *MuCell®*, foi inventada no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sobre a direção do Dr. Nam P. Suh, do departamento de engenharia Mecânica [7, 8]. O sistema *MuCell® Microcellular Process Technology*, utilizado em moldes de injeção, foi desenvolvido e comercializado pela Trexel nos seus laboratórios em Kelsterbach na Alemanha [9, 7].

O sistema *MuCell®* é um processo de injeção microcelular e é atualmente utilizado na produção de peças plásticas para a indústria automóvel e doméstica, cujas peças finais apresentam, naturalmente, menor massa, logo têm um ciclo de injeção mais curto. As peças processadas apresentam uma menor qualidade superficial, quando comparadas com as obtidas por injeção convencional, consequência do processo de injeção de uma mistura de um polímero com gás (N_2 ou CO_2) [9, 10, 7]. Este sistema é caracterizado por ter uma alta pressão até 480 bares e uma pressão de injeção até 2500 bares [1, 11]. A injeção é realizada a baixa pressão e a pressão no gás, na entrada, deve variar entre os 15 e os 210 bares.

Em termos gerais, o sistema é constituído por um fuso de injeção próprio para o sistema *MuCell®* (Figura 2-3), um controlador do fluxo SCF (*Super Critical Fluid*) (Figura 2-4) e um sistema de preparação e controlo de gás que será posteriormente descrito.



Figura 2-3: Módulo de Injeção preparado para *MuCell®* [1].



Figura 2-4: Controlador do fluxo SCF [1].

Muitos investigadores têm estudado a relação entre os resultados obtidos na tecnologia *MuCell*® e a produção de espumas celulares [10, 12]. Estes investigadores constataram que a morfologia dos poros obtidos nos materiais processados, com a tecnologia *MuCell*®, pode ser alterada com a variação dos parâmetros do processamento. No entanto, não existe investigação significativa sobre a morfologia dos poros e os parâmetros de processamento.

Atualmente, estão a desenvolver-se trabalhos de investigação de materiais microcelulares para implantes em medicina, pois a porosidade e o tamanho dos poros são a chave principal para a regeneração das células em volta do implante [10].

2.2.1 Processo de fabrico e seus componentes

No que diz respeito aos conceitos chave podem ser distinguidos cinco, MPP, SCF, SCF *Inlet Pressure*, MFE e %SCF, descritos sucintamente nos tópicos seguintes [1]:

- **MPP** - *MuCell Process Pressure* (Pressão específica para o fuso de injeção). O MPP impede a expansão do gás e mantém a solução de fase singular entre o polímero e o gás.
- **SCF** - *Super Critical Fluid*: Estado, ponto crítico, em que o gás fica com as propriedades de um líquido (incompressível), tratando-se todavia de um gás.
- **SCF Inlet Pressure**: Pressão atual na zona de entrada (cilindro de plasticização) onde é injetado o gás.
- **MFE** - *Mass Flow Element*: Componente que mantém a estabilidade do fluxo de SCF durante o processo.
- **% SCF**: Percentagem de N₂ ou CO₂ existente na solução durante a fase singular que é calculado com base no peso do material a injetar (peça plástica em *MuCell*®).

Para o fabrico de uma peça por injeção (peça plástica em *MuCell®*) é necessário realizar seis etapas, cujas quatro primeiras estão representadas na Figura 2-5, [1, 7, 13, 14]:

1. O gás é comprimido até atingir o ponto SCF (Figura 2-6);
2. Realização de operações de controlo e de dosagem do fluxo;
3. Injeção do fluxo gasoso no estado SCF, no material a injetar; dissolução do gás no polímero; rotação do fuso e formação de uma solução de fase singular (nucleação);
4. A solução é mantida a baixa pressão e injetada para o interior do molde;
5. Crescimento celular, onde se dá a expansão do gás no interior do molde originando pequenas bolhas por ação da pressão e temperatura atingida;
6. Formação da peça plástica de acordo com a geometria da zona moldante do molde.

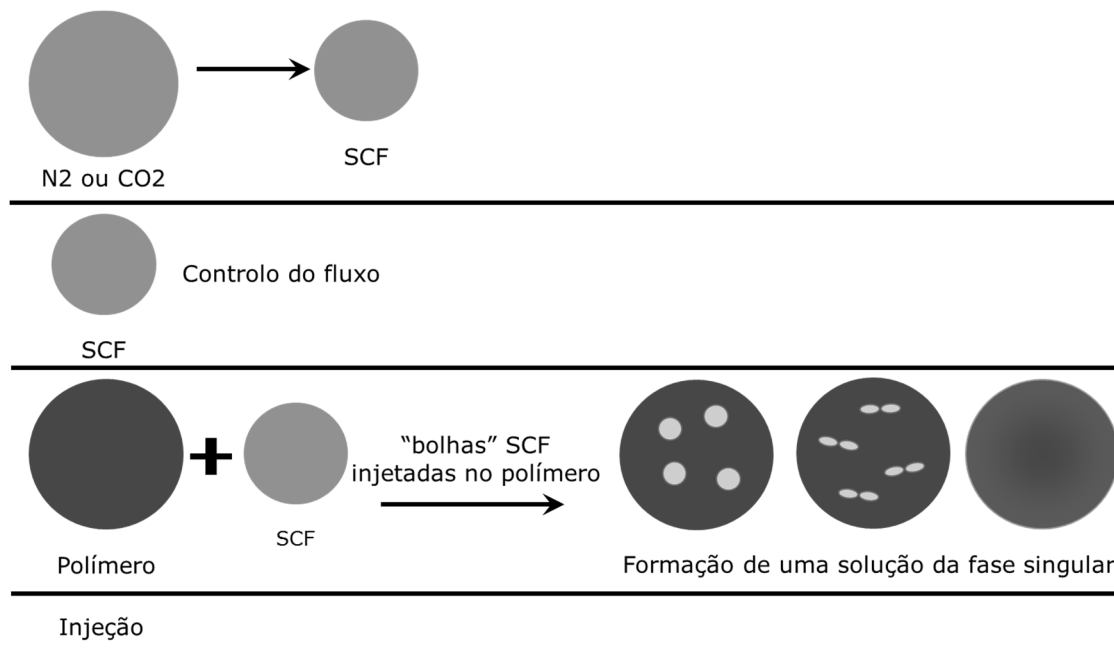


Figura 2-5: Processo do fluxo a injetar de solução de fase singular [1].

Em 1995 Wag, Cox e Campbell realizaram estudos sobre espumas microcelulares obtidas por injeção [15]. Nestes estudos, foi pressurizado PP com CO₂ durante três dias a 1.034×10^7 Pa. Este material foi posteriormente processado por injeção. A pressurização com gás do PP, permitiu-lhes concluir da sua importância no controlo da densidade da moldação obtida (espuma). No entanto, só algumas bolhas microcelulares foram observadas na moldação obtida por este processo.

Em 1999, Shimbo realizou testes experimentais por injeção *in-line* com CO₂ (espuma microcelulares), em estado SCF, diretamente no meio no cilindro de plasticização. Os resultados observados por Shimbo obtiveram uma estrutura de espuma microcelular não uniforme do tamanho da célula (20 µm a 100 µm) [16]. Mais tarde, Shimbo apresentou resultados de um outro processo de espuma microcelular em que utilizou uma máquina de injeção com fuso e êmbolo. Neste caso,

o fuso foi utilizado para a plasticização do polímero e o êmbolo para a injeção da solução (polímero mais gás) para o interior do molde. Este processo é mais simples que o processo por injeção *in-line*, em que a solução em fase singular é criada separadamente [17].

Atualmente, o processo de moldação de espumas microcelulares é um caso de sucesso e é utilizado em máquinas de injeção com fuso recíproco [7]. O sistema de *MuCell®* elimina as etapas de compactação e depende, exclusivamente, da taxa de nucleação para criar e manter a estrutura celular uniforme [15].

Preparação do gás – Unidade SCF

O ponto crítico (CP), já anteriormente referido, corresponde ao ponto crítico onde o gás atinge o estado SCF. Este ponto é atingido a uma determinada pressão crítica (P_c) e temperatura crítica (T_c), em função do gás utilizado, Tabela 2-2 [1]. A difusão do gás no material acontece após atingir a pressão (D_p) e a temperatura (D_t). Na Figura 2-6 pode-se observar, de forma simplificada, este processo.

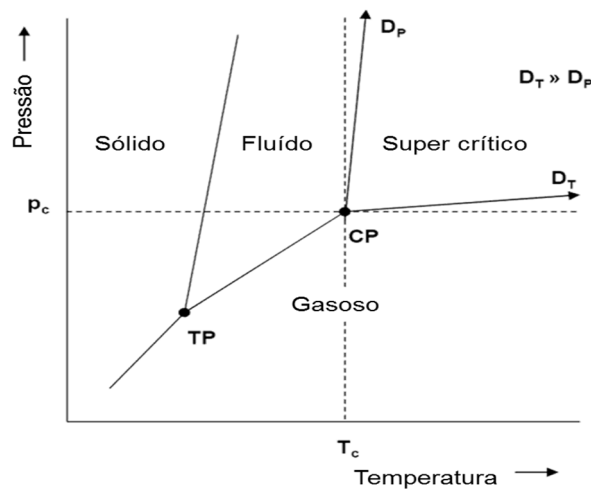


Figura 2-6: CP do SCF, pela relação entre a pressão e temperatura [1].

Tabela 2-2: T_c e P_c para o CP dos gases N_2 e CO_2 [1].

	T_c	P_c
N_2	-147 °C (-233 °F)	34 bar (500 psi)
CO_2	31 °C (88 °F)	71 bar (1050 psi)

No que diz respeito à 1ª e 2ª fase do processo de preparação do fluxo, onde estão presentes a compressão, controlo e dosagem do fluxo SCF, estas são representadas pelo sistema seguinte, Figura 2-7 [11].

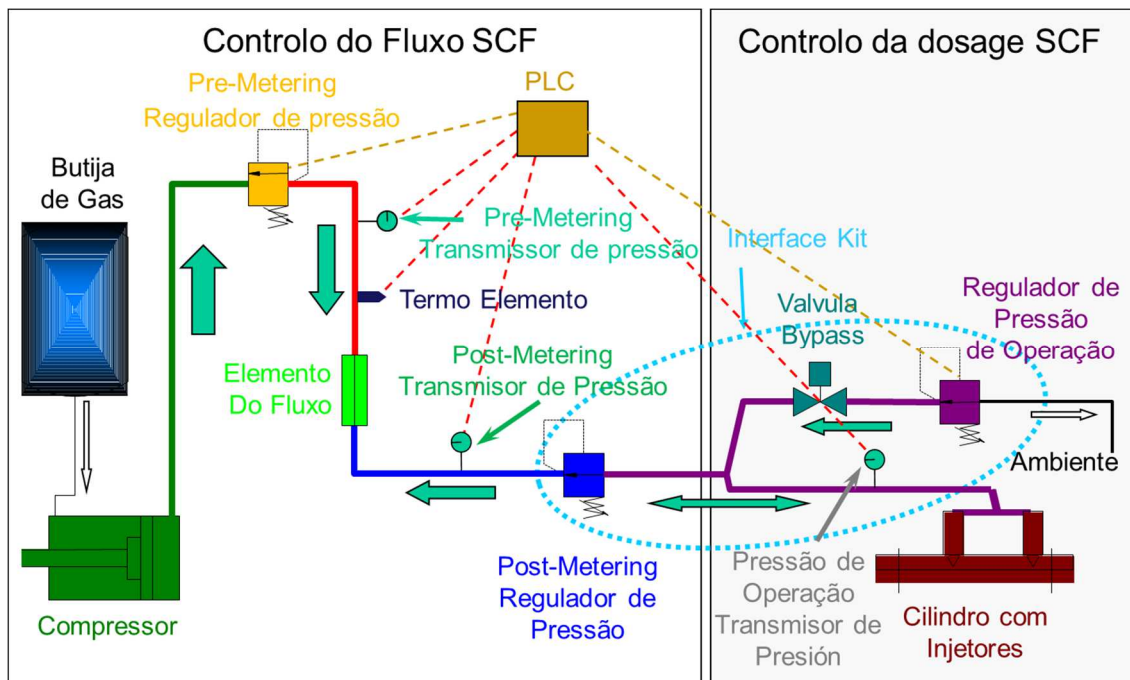


Figura 2-7: Processo de preparação do fluxo SCF [11].

Na Figura 2-7 pode-se observar esquematicamente o processo de preparação do fluxo SCF. O gás da garrafa (pressurizado) é comprimido no compressor até se ter a pressão necessária para o gás atingir o estado crítico. O gás é regulado em termos da sua pressão (regulador de pressão) e temperatura, por forma a se atingir o estado SCF. Em simultâneo, é controlada a sua dosagem expulsando o excedente para o exterior. O material no estado SCF é "injetado" para o interior do cilindro de plasticização da máquina de injeção, iniciando-se assim a mistura para a criação da solução em fase singular entre o gás e o polímero.

Nas Figuras (Figura 2-4, Figura 2-8, Figura 2-9 e Figura 2-10) pode-se observar o sistema de controlo do processo [11].

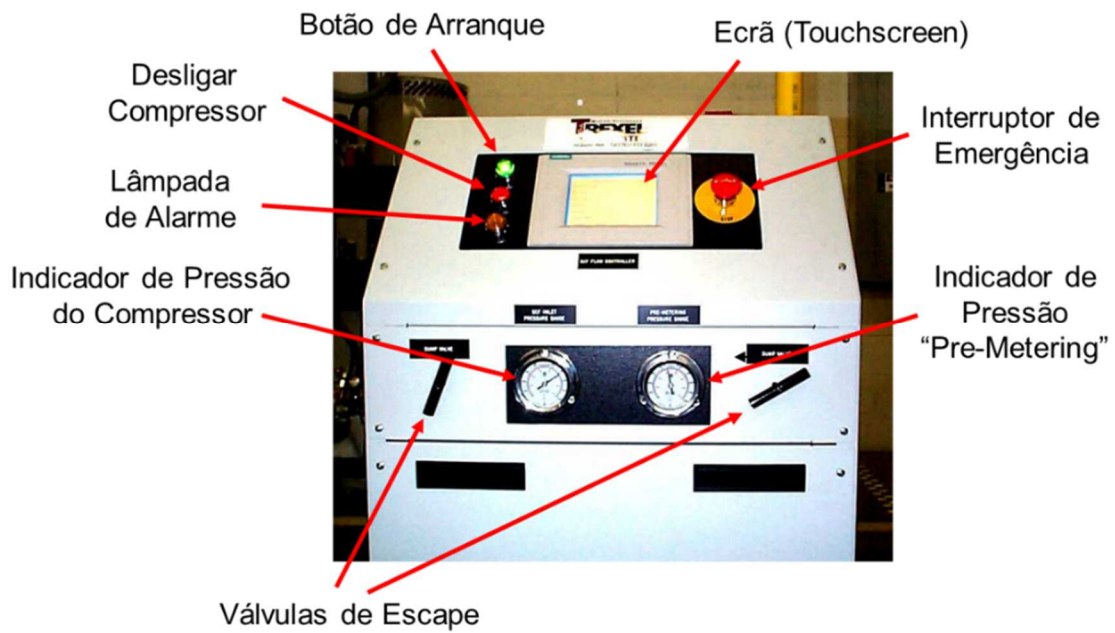


Figura 2-8: Controlador de fluxo SCF descriminado [11].

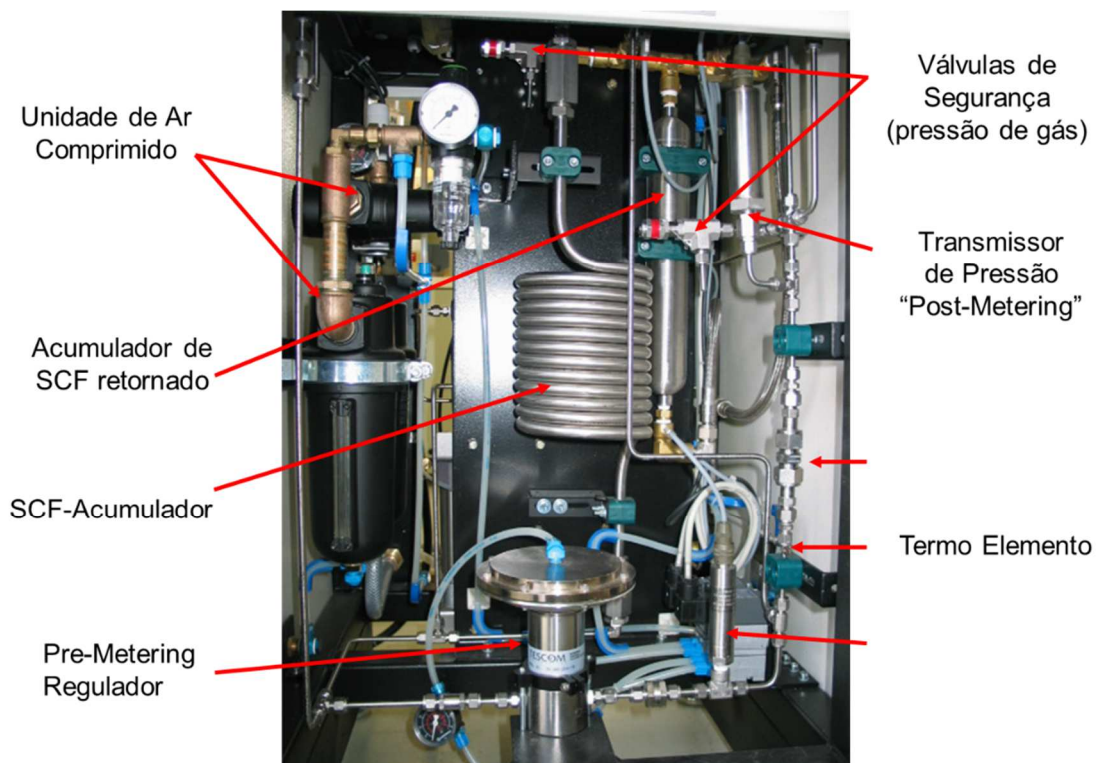


Figura 2-9: Controlador de fluxo SCF descriminado [11].

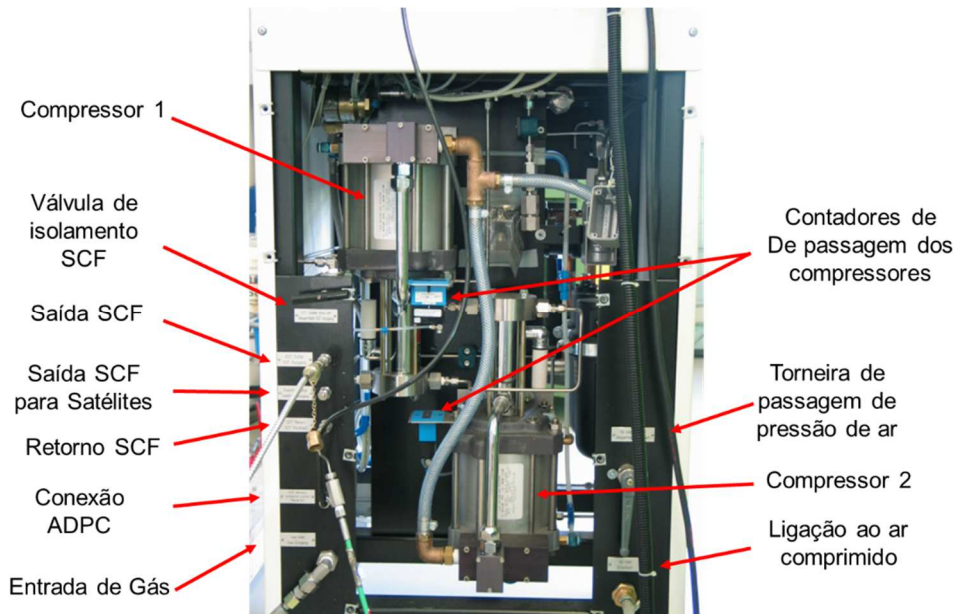


Figura 2-10: Controlador de fluxo SCF discriminado [11].

Unidade de Injeção

Tal como referido anteriormente a unidade de injeção é modificada para que seja possível a injeção de peças com características *MuCell®*. É adaptado à máquina de injeção, um ADPC (*Automatic Delivery Pressure Controller*), um regulador automático de pressão operacional (Figura 2-11), que por sua vez é ligado ao controlador de fluxo SCF [11]. Junto da unidade de injeção, é ainda adicionado um regulador de pressão e dois indicadores de pressão: um para a pressão de operação e outro para a pressão *Pos-Metering*.

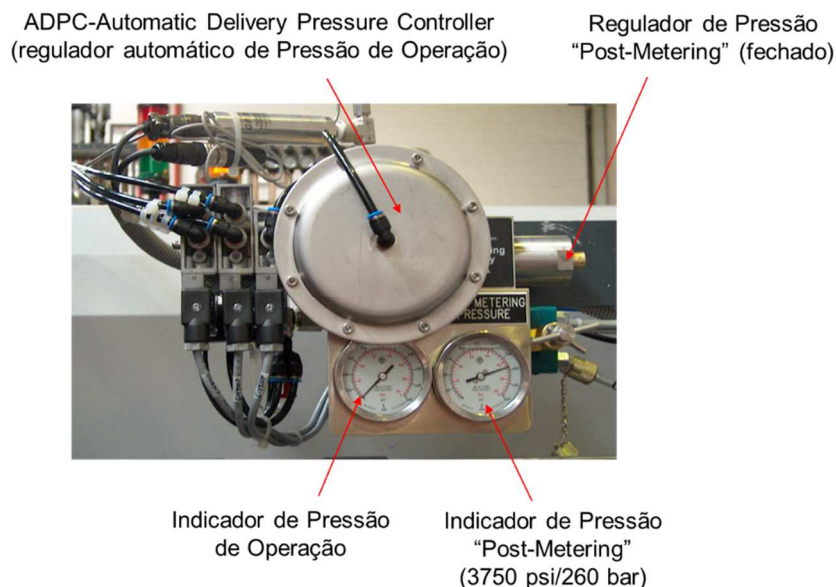


Figura 2-11: Regulador de Pressão adaptado à unidade de injeção [11].

Para além do ADPC é ainda, adicionado á máquina de injeção, o injetor do fluxo SCF. Este recebe o gás já no estado SCF, proveniente do controlador do processo, e injeta-o na unidade de plasticização. O injetor está representado na Figura 2-12 [11].

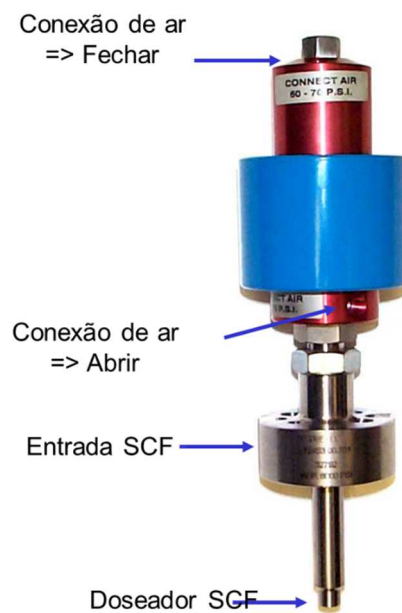


Figura 2-12: Injetor de fluxo SCF.

O fuso (sistema de plasticização) é constituído por três zonas principais: válvula de antirretorno do gás, uma zona de passagem (onde é injetado o fluxo SCF) e uma zona de mistura (onde o gás é misturado com o fundido e se forma a solução em fase singular) [11]. No que refere à sua geometria este deve garantir uma relação de comprimento/diâmetro (L/D), de 24/1.

O sistema de injeção e anti-retorno do gás podem ser observados nas figuras seguintes (Figura 2-13, Figura 2-14).

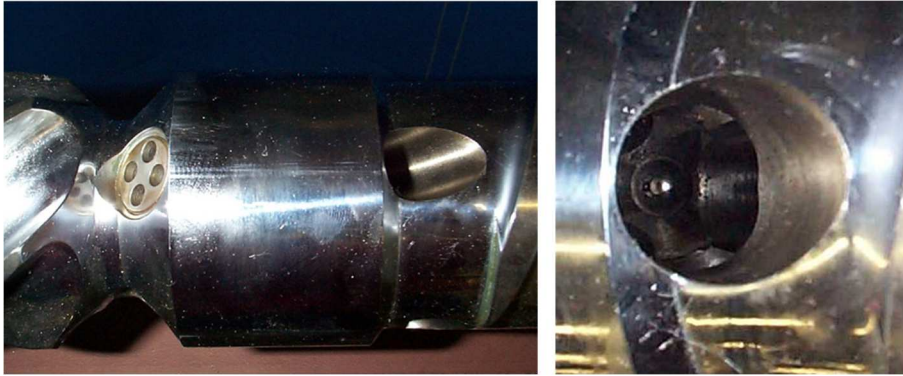


Figura 2-13: Válvula de retenção de bolhas da válvula antirretorno [11].



Figura 2-14: Filetes de marcha oposta da haste da válvula antirretorno [11].

A zona de passagem do material e do gás é composta por filetes múltiplos (Figura 2-15). Nesta zona é injetado o fluxo SCF em pequenas bolhas (nesta zona existe ainda separação entre o polímero e o gás) [11].



Figura 2-15: Zona de passagem do fuso de injeção [11].

A zona de mistura (Figura 2-16) é a zona onde é feita a mistura entre o gás e o polímero (em solução em fase singular) [11]. Esta etapa correspondente à 4ª fase presente no esquema da Figura 2-5.

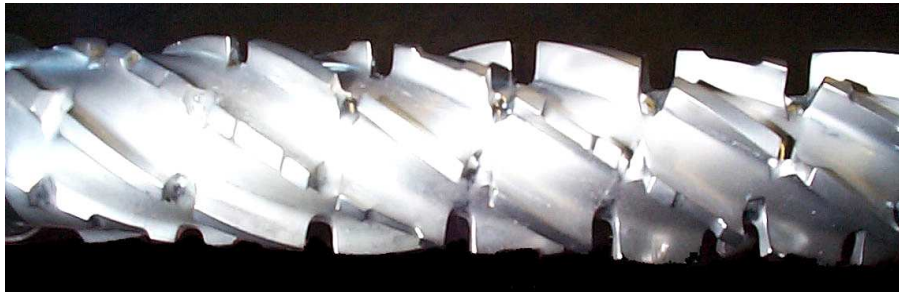


Figura 2-16: Zona de mistura do fuso de injeção [11].

Numa máquina de injeção com sistema *MuCell*® adaptado, deve ser sempre conseguida a solução em fase singular (entre o gás e o polímero) e por tal é necessário controlar três parâmetros: o agente expensor, a temperatura e a taxa de corte [7].

Na Figura 2-17, pode-se observar a unidade de injeção *MuCell*.

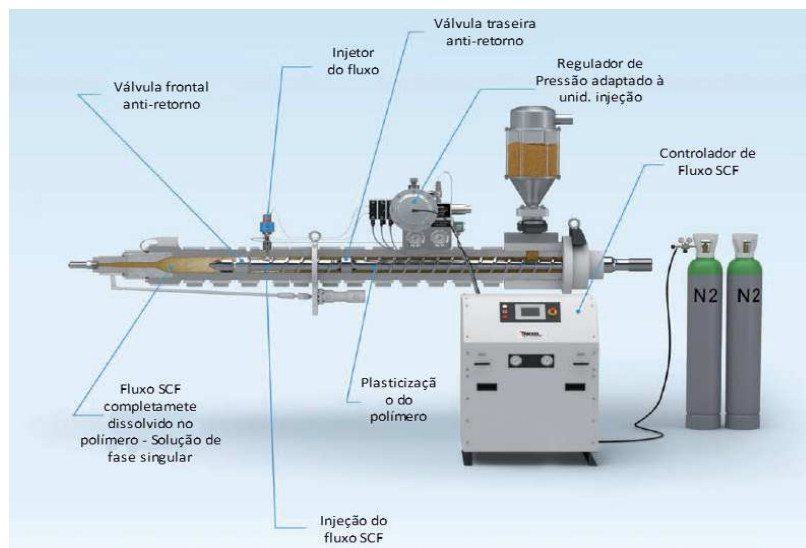


Figura 2-17: Sistema de Injeção *MuCell*® [18].

2.2.2 Vantagens Vs. Desvantagens

As principais vantagens do processo *MuCell*® são: redução de material (em peso) em cerca de 20%; liberdade de *design* no que refere à complexidade das peças a processar e às suas dimensões, tamanho; compatibilidade com diversos materiais; a não existência de agentes químicos no polímero da peça injetada (contrariamente às espumas químicas); manutenção das propriedades de reciclabilidade; redução do ciclo de moldação; redução de empenos e melhor estabilidade dimensional; fácil implementação do processo.

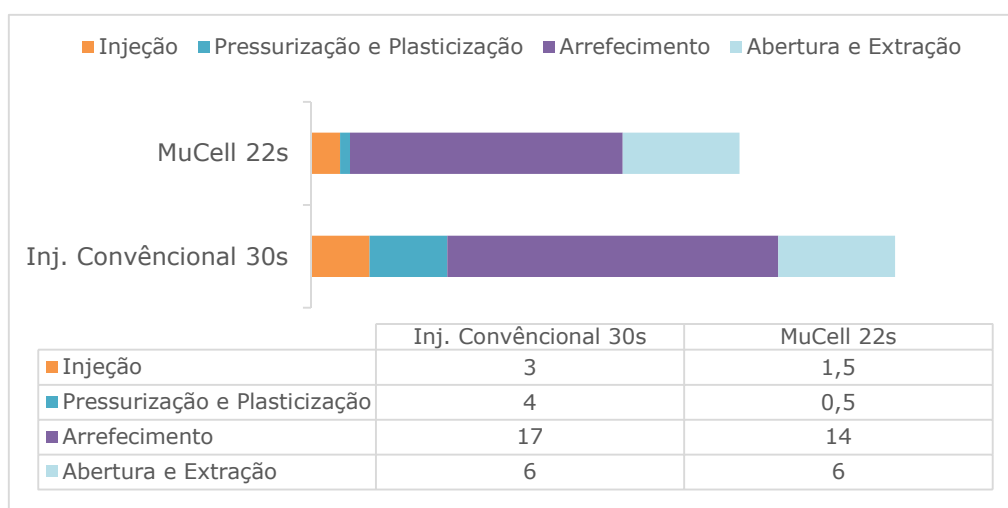


Figura 2-18: Comparação entre o processo de injeção convencional e o processo de injeção *MuCell*® [18].

De acordo com os trabalhos de investigação na área (Figura 2-18), o processo de injeção *MuCell*® apresenta, também, vantagens em termos do ciclo de moldação: 8 segundos quando comparado com o processo de injeção convencional com um mesmo polímero a injetar e um ciclo de 30s, cerca de 26% da redução do tempo de ciclo [18, 19]. Essa redução é significativa nas duas primeiras etapas do ciclo especialmente na pressurização e plasticização, pois este processo não necessita de 2ª pressão (esta fase é substituída pelo gás a altas temperaturas). O arrefecimento embora com menor impacto tem também um tempo de ciclo inferior pois a quantidade de material é menor, o que tem como consequência um menor tempo de arrefecimento e, também, uma significativa redução de empeno nas peças processadas com a tecnologia *MuCell*®.

Contudo este processo exige um elevado controlo do gás, apresenta peças com menor resistência ao impacto (vantagem para certas aplicações), um elevado custo inicial, necessidade de formação e a literatura científica é ainda pouca.

2.2.3 Influência da geometria e processos de trabalho de um molde para *MuCell*®

O *Journal of Cellular Plastics* apresentou um artigo relativo à produção de implantes regenerativos (*MuCell*®), com uma estrutura interna porosa semelhante à até então utilizada na medicina [10]. Neste estudo, no processamento dos implantes, foram utilizados dois moldes de injeção com geometrias diferentes, para os mesmos parâmetros de processo. As peças obtidas apresentaram estruturas porosas diferentes e, naturalmente essas diferenças foram investigadas. O polímero utilizado foi o TPU (poliuretano) e o agente expensor foi o CO₂. No primeiro molde foram

processados seis anéis, Figura 2-19 (imagem à esquerda (A)); no segundo molde foram processados seis discos, Figura 2-19 (imagem à direita (B)). Em ambos os moldes foi feita uma análise preliminar da viabilidade do processo e foram analisados e estudados os poros existentes nas estruturas processadas por injeção por *MuCell*®, com recurso a um microscópio.

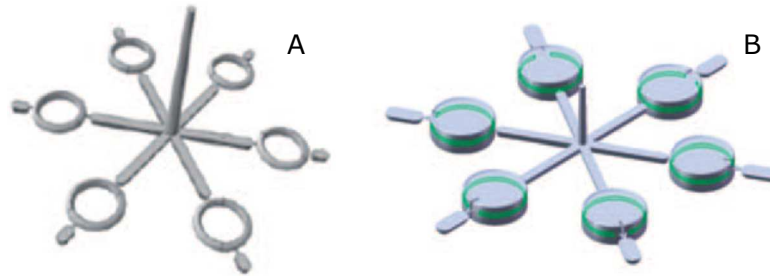


Figura 2-19: Casos de estudo: implantes obtidos com tecnologia *MuCell*® [10].

Ambos os moldes têm canais, de alimentação de plástico, semelhantes, apresentando o molde (B) um canal mais espesso e mais curto [10], conseguindo-se deste modo uma maior nucleação e crescimento celular, durante o escoamento do fluxo na cavidade. Obtém-se, deste modo, melhores resultados em termos da morfologia do poro, nomeadamente na criação de poros de maiores dimensões e por consequência, menor peso face ao volume da peça. Na análise realizada por um microscópio, Figura 2-20, observa-se à esquerda a estrutura dos anéis (A) e à direita é apresentada a estrutura dos discos (B) processados por injeção *MuCell*®. Consequentemente, quanto menor for a relação L/D (comprimento/espessura) do canal de alimentação, maior porosidade será obtida na peça a processar. Contudo, por o molde dos discos apresentar cavidades com maior quantidade de material, a variação nos resultados dos poros obtidos é maior, bem como a possibilidade de um preenchimento incompleto, maior tempo de arrefecimento e maior contração da peça.

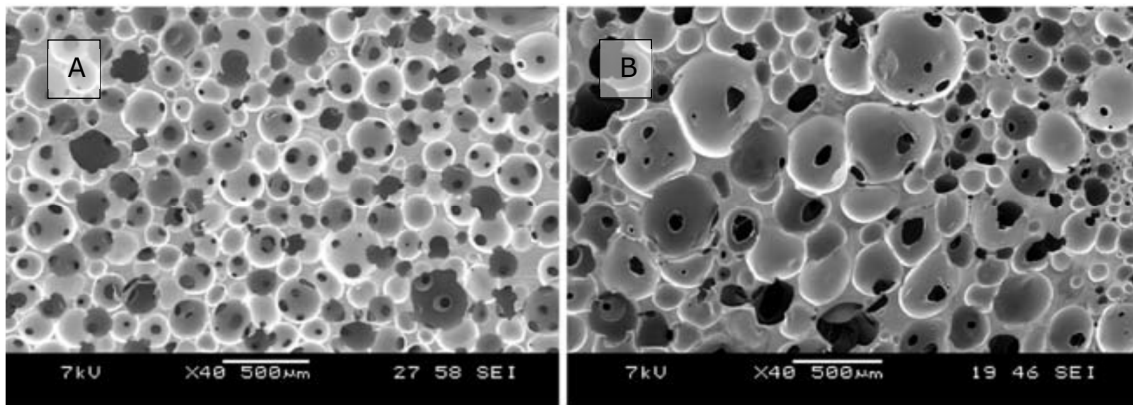


Figura 2-20: Estrutura porosa da moldação após uma injeção a 30mm/s [10].

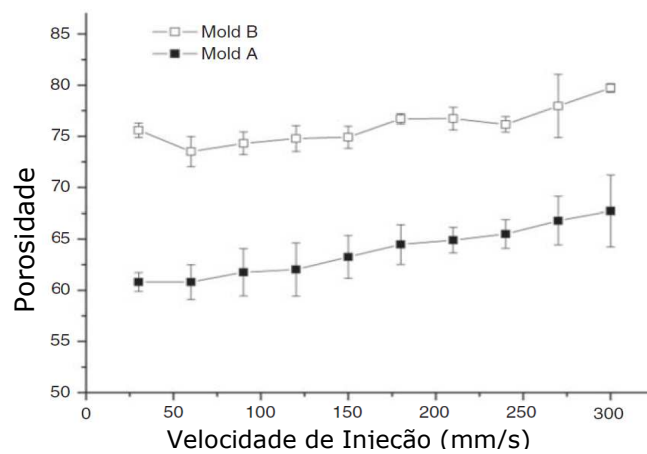


Figura 2-21: Diferença da porosidade segundo a variação da velocidade [10].

Um importante fator analisado foi o da variação da velocidade de injeção, onde se verificou que, quanto maior a velocidade de injeção maior será a percentagem de porosidade na peça [10]. Essa análise é possível observar na Figura 2-21. No entanto, embora a peça apresente mais poros, a dimensão do poro diminui com o aumento da velocidade, como decorre da análise da Figura 2-22.

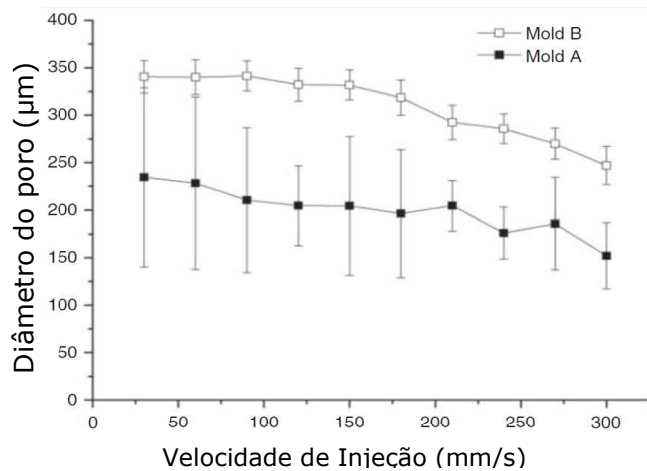


Figura 2-22: Diâmetro dos poros versus velocidade injeção [10].

Um outro aspeto estudado e não menos importante foi o tamanho da ligação (conexão) entre os poros, que também diminuem com o aumento da velocidade, Figura 2-23. No entanto, contrariamente à porosidade (nº de poros) as conexões são superiores no molde (A), molde dos discos, que no (B), mas no molde (B) o tamanho das conexões apresenta-se mais uniformes que as do molde (A) [10].

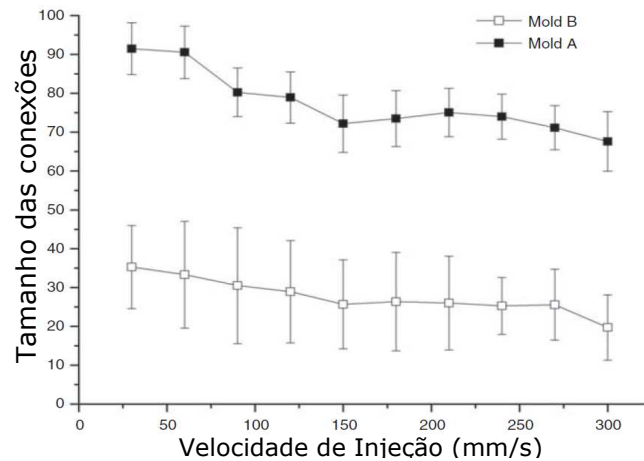


Figura 2-23: Diferença do tamanho das conexões dos poros segundo a variação da velocidade [10].

Por último, foram analisadas as peças processadas pelos dois moldes, com iguais parâmetros. Os resultados são apresentados nas Figura 2-24 e Figura 2-25 [10]. Os parâmetros analisados foram a redução de peso, percentagem de gás, temperatura do molde, temperatura de plasticização e velocidade de injeção. A partir da análise das figuras, foi possível concluir que quer na percentagem de porosidade máxima quer no tamanho dos poros, as peças processadas no molde (B), apresentam valores superiores de porosidade máxima para todos os parâmetros de processo.

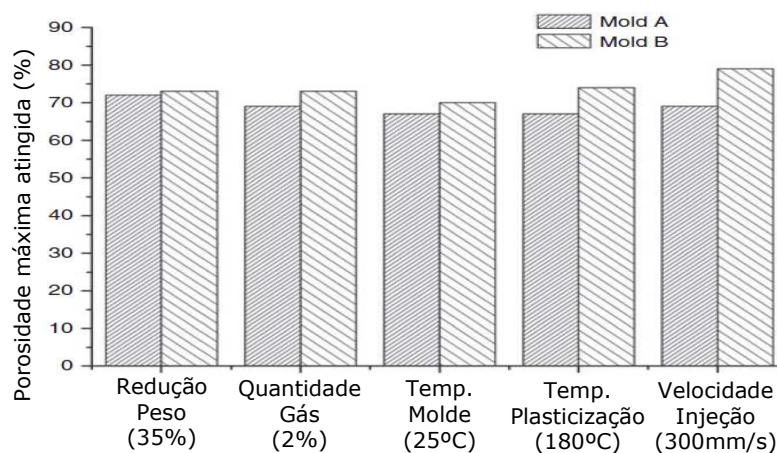


Figura 2-24: Porosidade máxima versus parâmetros de processo [10].

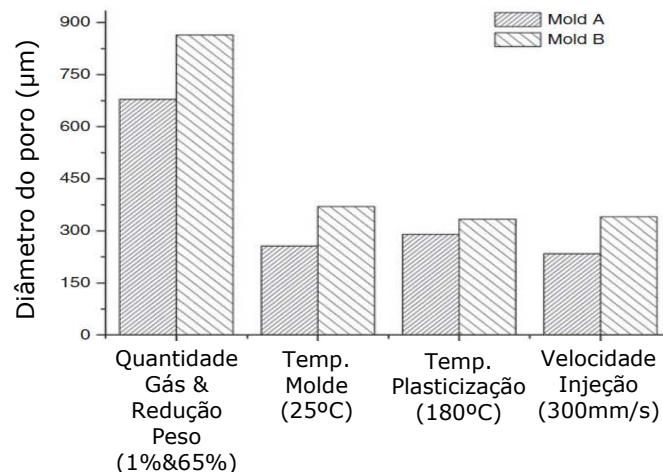


Figura 2-25: Tamanhos de poro versus parâmetros de processo [10].

Os dois parâmetros com maior influência no processamento por injeção *MuCell*® são a geometria do canal e a velocidade de injeção. Estes parâmetros, quando devidamente controlados, permitem ter um melhor domínio da porosidade da peça final. A relação entre o comprimento e o diâmetro do fuso afeta a porosidade da peça, o exemplo B resulta em porosidade com maior dimensão, logo maior fração volumica, no entanto proporciona uma maior variação dimensional e distribuição dos poros desorganizada. No que se refere à velocidade de injeção o seu aumento revela uma maior percentagem de porosidade, com uma menor dimensão do poro, e a conexão entre os poros é menor.

2.2.4 Aplicações

Os polímeros utilizáveis no processamento por injeção com *MuCell*® são praticamente todos (Figura 2-26). [18]. Os Materiais termoplásticos tendem a ter um melhor enchimento resultante da facilidade no processo de mistura entre o polímero e o fluxo SCF. Por outro lado, os materiais amorfos proporcionam uma maior redução de peso e, também, um menor tempo de ciclo de injeção.

Good Value		Great Value	
HDPE	Acrylic	PP Talc	PET Glass
PVC	HIPS	PC/ABS	PP Glass
TPE	LCP Blends	PC	PPO Blends
ABS	PA6/6.6 Unfilled	PEEK	PSU
TPV	GPPS		PIE
PP Unfilled	POM		PA6/6.6 Glass
TPO			PBT Glass

Figura 2-26: Materiais utilizados na produção de peças com recurso ao sistema *MuCell*® [18].

Atualmente, o processo *MuCell*® é utilizado no fabrico de peças para o setor automóvel, eletrónico, médico, embalagem e bens de consumo. Na

Tabela 2-1 são apresentados alguns casos práticos de aplicações de peças processadas com a tecnologia *MuCell*®.

Tabela 2-3: Aplicações do processo *MuCell*® [19].

Automóvel		<p>Ford Escape/Kuga <i>MuCell</i>® <i>Intrument Panel</i> (Painel de Instrumentos)</p> <p>Redução aproximada de 0,5 kg;</p> <p>Melhoramentos das propriedades mecânicas;</p> <p>Redução de custos até 3 USD por veículo;</p> <p>Redução de material até 45% por cada tonelada de polímero.</p>
		<p>Mercedes Benz / <i>Rear Door Carries</i> (Painel de porta)</p> <p>Redução das paredes (1,8 a 2 mm);</p> <p>Redução do tempo de ciclo superior a 50%;</p> <p>Elevada estabilidade dimensional.</p>
		<p>CAM Cover / Painel de navegação</p> <p>30% de exigência menor da máquina (350 t em vez de 500 t);</p> <p>Melhoramentos tempo de ciclo;</p> <p>Redução de peso da peça;</p> <p>Melhor estabilidade dimensional.</p>

		<p>Rear Thorax <i>Airbag Cover</i> (tampa do Airbag)</p> <p>Estabilidade dimensional melhorada;</p> <p>Redução do peso até 9%;</p> <p>Redução de marcas na face visível.</p>
Medicina		<p>Existem enumeras aplicações, contudo devido aos acordos de confidencialidade não podem ser divulgadas pela <i>MuCell®</i>.</p> <p>Equipamentos de análise de sangue;</p> <p>Eletrocardiograma e Oxigénio <i>Sensing</i>;</p> <p>Endoscópios;</p>
		<p>Monitores cardíacos;</p> <p><i>Heart Pumps</i> (Coração bombeia);</p> <p>Inaladores;</p> <p>Grampos;</p> <p>Aparelhos ortopédicos;</p> <p>Êmbolos das seringas.</p>
Embalagem		<p><i>Storage Bin</i> (embalagem para armazenamento)</p> <p>Redução de material base de 30 a 50%;</p> <p>Redução de peso de 5,5 a 6%;</p> <p>Redução de preço de injeção 15%.</p>
		<p><i>Storage Bin</i> (embalagem para armazenamento)</p> <p>Redução de material e peso de 14 %;</p> <p>Redução de preço de injeção 15%.</p>
Indústria		<p><i>Palette Cover</i> (Cobertura de paletes)</p> <p>Redução de peso;</p> <p>Redução de empeno;</p> <p>Redução de força de fecho.</p>
		<p><i>Plastic Palette</i> (paleta de plástico)</p> <p>Redução de peso;</p> <p>Redução de empeno;</p> <p>Redução de força de fecho.</p>

2.3 Moldação por injeção com expansores químicos

Na moldação de componentes plásticos por injeção com agentes expansores químicos, podem ser distinguidos dois tipos de processos [20]:

- Injeção a baixa pressão;
- Injeção a alta pressão.

Os agentes expansores são geralmente compostos químicos que se decompõem aquando do processamento do fundido [20]. Como exemplo de agentes expansores químicos podem distinguir-se: o bicarbonato de sódio, com pequenas quantidades de ácido cítrico ou tartárico, e a azodicarbonamida. Normalmente, estes estão disponíveis em pó e podem ser utilizados diretamente no processamento, quando misturados com o granulado da matriz polimérica. Este sistema pode ser vantajoso quando comparado com o sistema *MuCell*®, pois não há a necessidade de se controlar o fluxo, bem como a utilização dos equipamentos inerentes ao processo *MuCell*®.

2.3.1 Injeção a baixa pressão

A espuma estrutural moldada é produzida através da decomposição do agente expensor pré-selecionado numa determinada matriz polimérica, com a injeção posterior de um volume de material inferior ao volume necessário ao enchimento da cavidade do molde, cerca de 75% [20]. A expansão do polímero contra as paredes do molde, Figura 2-27, e preenchimento da zona moldante é provocado pelo gás gerado pelo agente expensor, sendo esta a única pressão resultante durante o processo de injeção, e por essa razão é designado por um processo de baixa pressão.

Relativamente ao processo de alta pressão os moldes utilizados são mais baratos uma vez que a força de fecho é inferior.

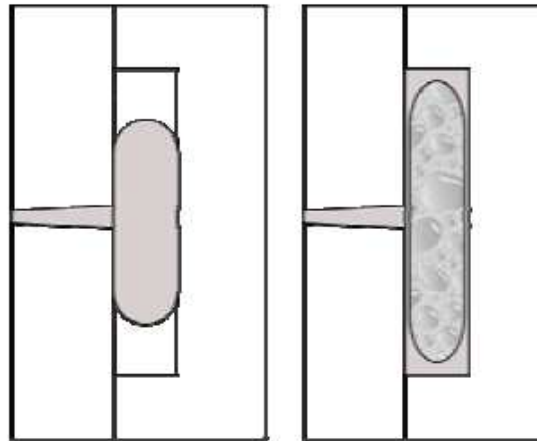


Figura 2-27: Moldagem de injeção com expansores químicos a baixa-pressão [20].

2.3.2 Injeção a alta pressão

Neste processo, a cavidade é completamente cheia, sendo gerada a pressão de injeção típica do processo de injeção convencional [20]. Com a utilização dos mesmos materiais, é gerada uma superfície sólida de material, resultante do choque térmico do material com a superfície moldante do molde, onde a expansão do núcleo é obtida com a realização de uma pré-abertura das zonas moldantes, até se obter as dimensões da impressão pretendida. Neste processo consegue-se obter superfícies de material uniforme (superfícies moldantes), mais espessas, melhor rigor dimensional da peça e obter-se melhor qualidade superficial. É, também possível regular a densidade do produto final a partir da pré-abertura. Por outro lado, a maior pressão exercida sobre o molde pode provocar marcas superficiais na peça a ser processada.

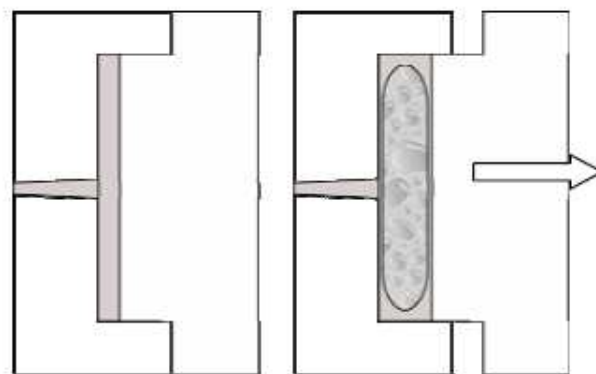


Figura 2-28: Moldagem de injeção com expansores químicos a alta-pressão [20].

2.4 Parâmetros influentes na moldação de injeção com agentes expansores

O investigador Sampaio, realizou trabalhos de investigação relativos à moldação por injeção com agentes expansores e constatou que os parâmetros de injeção têm uma natural influência nas peças processadas [20, 21].

Segundo fontes da empresa Trexel, representante do processo *MuCell*® os parâmetros que influenciam a moldação de peças processadas com *MuCell*® resumem-se na seguinte Tabela 2-4 [11]:

Tabela 2-4: Parâmetros que influenciam a moldação de peças processadas por injeção com *MuCell*®:

Parâmetro	Possibilidade	Resultado
Tipo de gás	CO ₂	Maior redução de peso, devido a um aumento superior das bolhas face ao N ₂ .
	N ₂	Células mais pequenas e distribuição mais homogenia das células.
% de gás	Aumento	Tendencialmente o material fica mais poroso e mais leve, com tudo o seu aumento excessivo pode criar estrias e má deformação das bolhas.
Pressão de processamento	Aumento	Maior absorção do gás, por consequência uma maior quantidade de gás e uma estrutura celular mais fina e logo uma maior redução do peso.
Temperatura do molde	Aumento	A temperatura só deve ser aumentada em caso de problemas de enchimento ou necessidade de redução do peso, para além de reduzir o peso, melhora as características de fluidez.
Temperatura do polímero	Aumento	Melhora as características de enchimento e possibilidade de redução de peso.
Velocidade de injeção	Aumento	Distribuição mais fina da estrutura celular, células mais pequenas e redução do peso.
Força de fecho	Redução	Melhoramento das fugas de gases, maior redução do peso, menor desgaste do molde e da máquina e redução do consumo de energia.

De seguida são apresentados alguns dos parâmetros mais exaustivamente.

2.4.1 Velocidade de injeção

A velocidade de injeção é a variável mais importante em termos de porosidade obtida nas peças a processar. Uma velocidade de injeção elevada (Figura 2-29.b)) proporciona uma maior queda de pressão, quase instantânea, ao longo do comprimento do fluxo [20]. Quanto maior a velocidade de descompressão, maior

será o número de células formadas, pois a instabilidade termodinâmica será superior, maior será a densidade e menor serão as dimensões celulares na fase de enchimento [22]. Como a parede superficial da peça vai ter uma menor espessura, o tempo de arrefecimento irá ser menor e por consequência o tempo de ciclo irá diminuir [20].

Quando se tem uma velocidade muito baixa, Figura 2-29.a), o enchimento do molde é naturalmente mais lento, pois a viscosidade do material aumenta, logo diminui a sua fluidez [20]. Uma velocidade reduzida gera uma maior espessura na superfície de contacto da peça com a zona moldante do molde, que por vezes restringe o canal de fluxo e obriga a uma maior pressão na zona de ataque para conseguir uma moldação completa.

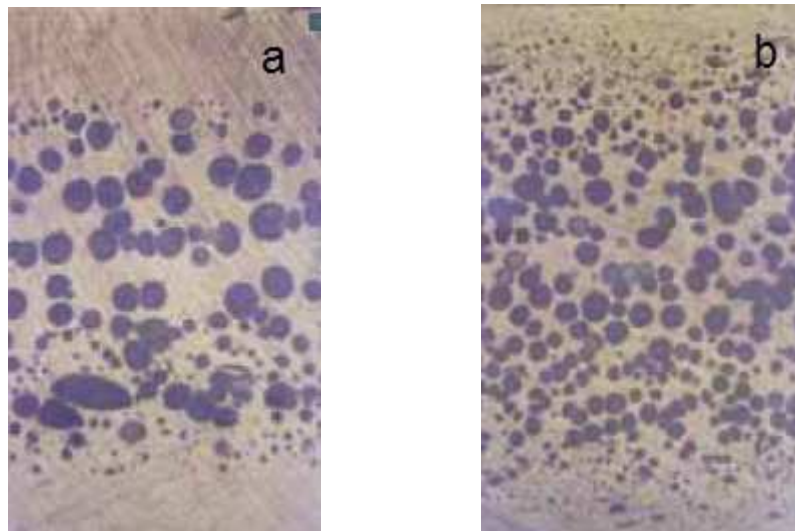


Figura 2-29: Efeito da velocidade de injeção e dimensões celulares (a: 50 mm/s ; b: 300 mm/s) [20].

2.4.2 Espessura da peça

Com o aumento da espessura das peças a processar é reduzida a queda de pressão no enchimento das mesmas [20]. O crescimento celular, associado à taxa de corte, é menor, pois a superfície da peça tem uma menor espessura ao longo do comprimento do fluxo. É, neste caso, também conseguida uma expansão mais homogénea, com poros com dimensões mais uniformes, Figura 2-30.

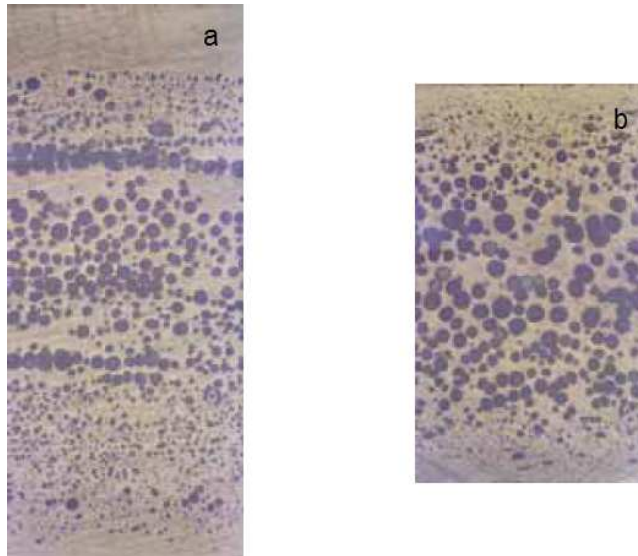


Figura 2-30: Influência da espessura nas dimensões celulares [23] (a: 7 mm; b: 5 mm) [20].

2.4.3 Temperatura do molde

Com a redução da temperatura do molde, aumenta o tempo disponível para o crescimento celular (a temperatura é um dos fatores que desencadeia o crescimento celular) e por consequência a porosidade é superior, pois as cascas obtidas são mais espessas [20, 23]. No entanto torna o ciclo de injeção mais longo.

2.4.4 Temperatura de injeção

Com a redução da temperatura do fundido a criação de poros (e dimensão) irá ser menor, pois a temperatura tem uma influência direta na taxa de difusão do gás através do material [20, 23]. Uma viscosidade mais elevada, reflexo de uma baixa temperatura, reduz a taxa de difusão do gás, a capacidade de dilatação da bolha diminui e aumenta a espessura superficial das paredes da peça.

2.4.5 Contrapressão

Com o aumento da contrapressão promove-se uma mistura mais homogênea, garantindo a decomposição do agente expensor e reduzindo a viscosidade do material no cilindro, pelo aumento do tempo de plasticização [20, 22]. Consequentemente ao pressurizar o fundido aumenta-se a solubilidade do agente expensor do fundido, inibe-se a geração de micro vazios no interior do cilindro e aumenta-se a taxa de nucleação [22]. Com uma viscosidade reduzida o fundido é transferido mais rapidamente para o interior do molde e a zona superficial da peça sem gás é mais

fina, o que viabiliza um enchimento do molde mais rápido e a utilização de menor quantidade de polímero [20].

2.5 Espumas microcelular

2.5.1 Espumas Poliméricas

Uma espuma polimérica, plástico expandido ou plástico celular, é composta por uma matriz polimérica, fase sólida, e um agente expensor, fase gasosa [24].

As espumas podem ser obtidas a partir de diversos polímeros com a adição de um agente expensor para geração do gás na matriz polimérica. Os polímeros que podem ser utilizados são: poliuretano, polipropileno, polietileno, policloreto de vinila, poliestireno, polietileno-co-acetato de vinila, poliestireno-co-butadieno, entre outros [25].

As principais propriedades de interesse técnico conseguidas pelas espumas são as seguintes: isolamento térmico e acústico; amortecimento; menor densidade de material ($1,6 \text{ kg/m}^3$ a 960 kg.m^3) e maior rigidez específica (relação rigidez/peso) [26].

Para além da variação da densidade, que estabelece as propriedades mecânicas do material, existe ainda variação no formato das células das espumas. A sua natureza admite células abertas (Figura 2-31 a) ou células fechadas (Figura 2-31 b) [21, 27]. Numa espuma de célula fechada cada célula está envolvida por uma parede de polímero, numa espuma de célula aberta as várias células da espuma encontram-se interconectadas e com capacidade de absorver líquidos. Em suma as espumas de célula aberta apresentam maior capacidade de absorção de água e humidade, maior permeabilidade a gases e vapores e menor capacidade de isolamento térmico e elétrico.

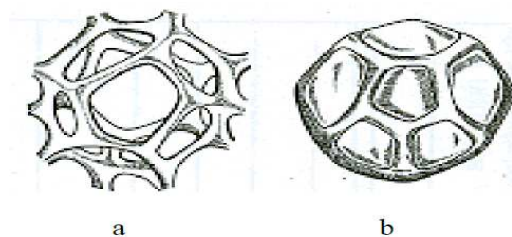


Figura 2-31: Representação esquemática da estrutura de uma espuma polimérica de célula aberta (a) e uma espuma polimérica de célula fechada (b) [21].

As espumas podem ser classificadas por flexíveis, rígidas ou semirrígidas, conforme a temperatura de transição vítrea, a composição química, o grau de cristalinidade e o grau de reticulação do material [24, 21].

Outra classificação das espumas poliméricas é feita de acordo com a sua aplicação, espumas para isolamento (leve, com densidade de 20 kg/m³, utilizadas para a construção), espumas para enchimento (macia e resiliente, utilizadas para colchões e proteção de embalagens frágeis) e espumas estruturais (espumas mais resistentes devido à sua superfície endurecida) [27].

Conforme a quantidade de gás dispersa na matriz polimérica a espuma pode ser classificada em baixa, média ou alta densidade, 100 kg/m³, 100 a 600 kg/m³ e > 600 kg/m³, respetivamente [24].

Para a formação de espuma polimérica são necessárias três fases: a formação de bolhas (nucleação), o crescimento das bolhas e a estabilização das bolhas. Partículas de materiais tais como SiO₂ e FeO₃ podem ser utilizadas como agentes de nucleação para a formação de bolhas a partir do gás dissolvido [24, 21].

O tamanho dos espaços livres na estrutura do polímero e a quantidade de moléculas de agente expensor que penetram os espaços livres dependem da estrutura e propriedades do polímero [25].

Na Figura 2-32 apresentada são descritas esquematicamente a formação de células e o crescimento celular de um polímero fundido [25]. Assim que injetados o processo dá início (Figura 2-32 a) com o aquecimento do polímero e do agente expensor, ainda numa temperatura sem que haja decomposição do agente expensor. A temperatura aumenta (Figura 2-32 b) e o agente inicia a decomposição. Em maior intensidade, a decomposição do agente expensor prossegue (Figura 2-32 c e d) e forma-se uma matriz supersaturada, pois a quantidade de gás gerada excede a solubilidade do gás fundido. As condições para a nucleação estão agora estabelecidas. A quantidade de agente expensor que não se decompôs provocará o processo de nucleação. Nas etapas seguintes (Figura 2-32 e, f, g e h) é dado o crescimento celular até que seja atingido um ponto de equilíbrio com a tensão superficial das paredes da célula.

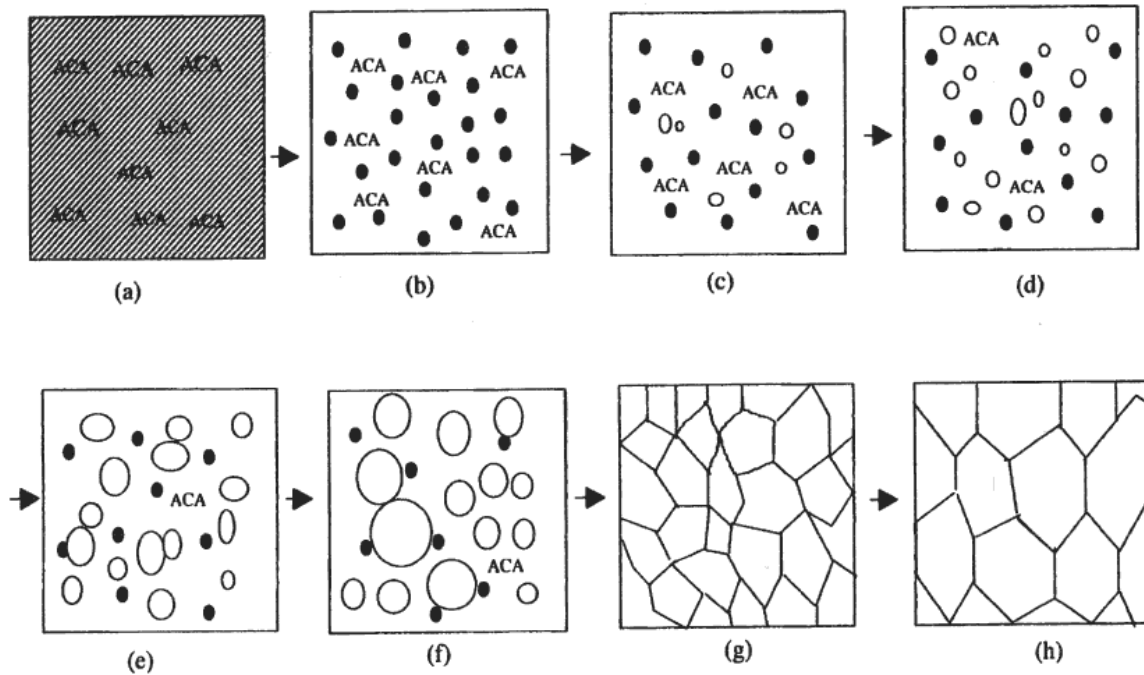


Figura 2-32: Formação de células e crescimento celular de um polímero fundido.

Para o processo de expansão de materiais poliméricos são utilizados agentes químicos, que quando da sua decomposição, a altas temperaturas, libertarão gases, ou a introdução de agentes físicos, que são diretamente acionados ao polímero no processo processamento [28].

Os agentes físicos mais utilizados são o dióxido de carbono (CO_2), o nitrogênio (N_2), hidrocarbonetos alifáticos, como o butano, o cloro-flúor-carbono (CFC) [27]. Como principais expansores químicos são utilizados os azocompostos, os derivados de hidrazina, benzoaxinas e tetrazolas.

As espumas de poliuretanos, as principais espumas poliméricas, foram desenvolvidos em 1937 por Otto Bayer [25]. Atualmente as principais aplicações dos poliuretanos estão na indústria automóvel (espumas semirrígidas), na construção civil (espumas rígidas), em colchões, estofos e assentos (espuma flexível) e na indústria de calçados (poliuretano micro celular) [29].

Moldação por injeção de espumas poliméricas

A moldação por injeção é geralmente utilizada para produção de espumas poliméricas de aplicação estrutural, podendo ser utilizados agentes químicos ou físicos de expansão [27]. Pode ainda ser injetado gás, no qual o agente físico é adicionado diretamente ao molde por um canal de injeção.

Na injeção com agentes químicos estes são introduzidos juntamente com o polímero (tremonha da máquina) e decompõem-se no cilindro de injeção. Para permitir a expansão, a quantidade injetada deve ser menor que a quantidade necessária para o preenchimento da cavidade do molde (aquando a inexistência de agente expensor) [27]. O material que fica à superfície das peças injetadas, junto à zona moldante, tem uma expansão inibida, contrariamente ao restante que expande livremente, por tal na peça final, é conseguida uma superfície sólida e um núcleo expandido, com gradiente de densidade.

O tamanho final das células e a sua distribuição, é diretamente influenciável pela velocidade de injeção, a temperatura de injeção do fundido e o gradiente de temperatura e a pressão do molde [25].

A injeção de espumas poliméricas apresenta algumas vantagens relativamente à injeção convencional das quais se destacam: menor pressão de injeção, menor força de fecho, moldes mais leves e baratos, peças com densidade inferior e um menor consumo energético [25]. Contudo, apresenta também desvantagens: elevada rugosidade superficial, a adição de químicos para expansão do polímero, que pode contaminar a peça e as suas propriedades mecânicas são mais baixas que as peças produzidas sem gaz.

2.5.2 Espuma microcelular de nano-compósito de PP com sílica e injeção de Azoto

O PP é um dos polímeros mais utilizados na indústria devido ao bom equilíbrio entre as propriedades físicas e mecânicas, à sua reciclabilidade e ao baixo custo [30]. No entanto a espuma microcelular de PP tem sido um grande desafio em termos de processamento, devido à sua estrutura cristalina e às suas propriedades reológicas [31, 32]. Dificuldades essas colmatadas com adição de outros polímeros e/ou pequenos aditivos de argila (em camadas múltiplas) e sílica (em esferas), muito utilizadas para isolantes térmicos e acústicos [33]. Um dos pontos mais interessantes dos polímeros nano-compósitos (com aditivos de sílica) é o melhoramento significativo da tensão de tração comparativamente ao polímero virgem [34].

Na Figura 2-33 são apresentadas 4 micrografias típicas de superfícies de espuma obtidas a partir de nano-compósitos de PP com aditivos de sílica [34]. Quando o teor de sílica é aumentado, o tamanho das células diminui, mas a sua densidade aumenta. Contudo a diminuição do tamanho da célula só é visível para frações em peso até 8 wt%, conforme se pode ver nas figuras seguintes.

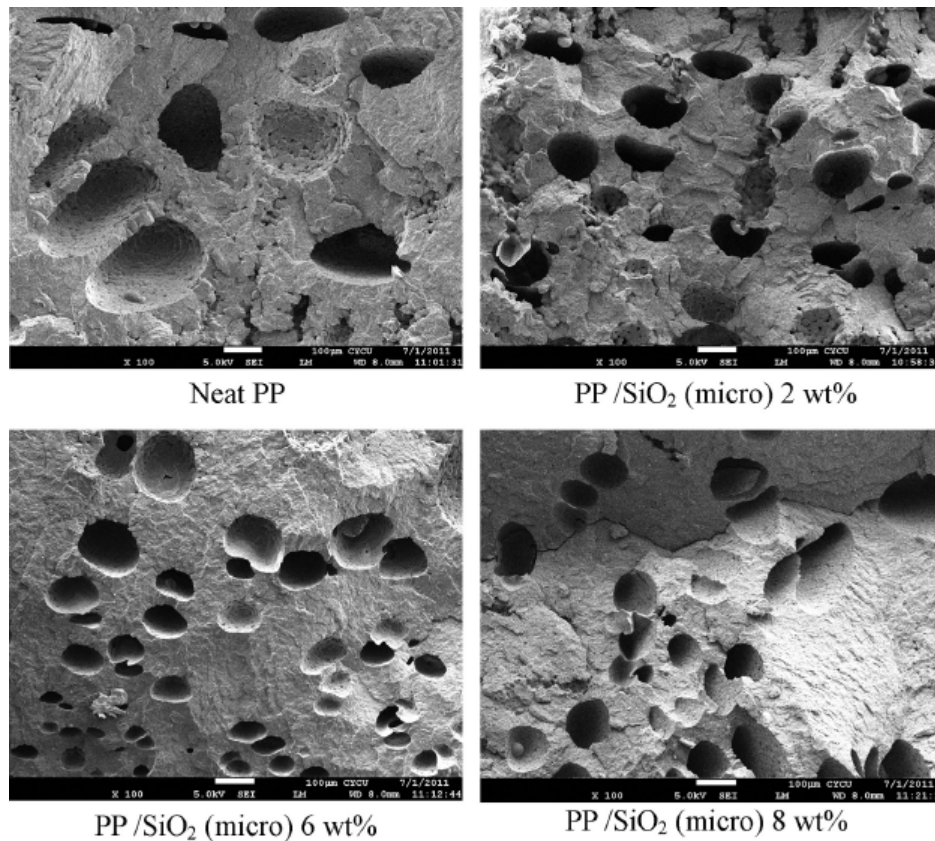


Figura 2-33: Estrutura celular de espuma de nano-compósito de PP com sílica, com a variação de quantidade de sílica [34].

2.6 Materiais de estudo

2.6.1 PP Natural

O Polipropileno (PP) foi descoberto e estudado nos anos 50, por Karl Ziegler e Giulio Natta, 1953, [35, 36, 37], tendo iniciado em 1957 a sua comercialização. A produção de polipropileno é estimada em 17 milhões de toneladas ao ano, com um valor superior a 11 bilhões de dólares por ano, sendo o seu consumo maior na China, seguindo-se os Estados Unidos da América, Japão, Alemanha, Itália, etc. [38]. É um

material durável com grande predominância na indústria automóvel, eletrónica e têxtil que contabilizam aproximadamente 50% das aplicações de PP na indústria.

O PP é um termoplástico semicristalino obtido através da polimerização de um gás propeno, um subproduto proveniente da gasificação da refinação do petróleo, esquema da Figura 2-34, na presença de um catalisador, com a necessidade de controlo da temperatura e pressão [36, 39, 40].

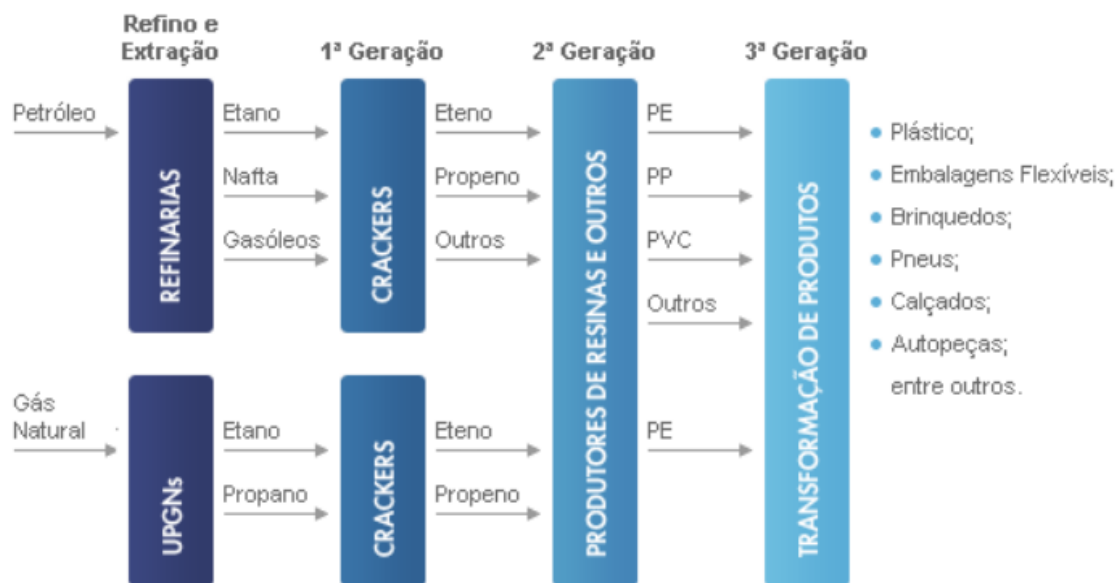


Figura 2-34: Esquema de refinação do petróleo [41].

O polímero PP admite uma temperatura de injeção de 215 a 245°C e uma temperatura de molde ideal, de 20 a 60°C. A contração varia aproximadamente de 1 a 2,5%. Para além destas características, importantes para moldes de injeção, apresenta ainda as características apresentadas na Tabela 2-5 [42].

Tabela 2-5: Propriedades do PP [42].

Propriedade	Unidades	Valor
Densidade	-	0,89 a 0,93
Tensão de rotura	MPa	20 a 40
Alongamento na rotura	%	1,5 a 600
Dureza <i>Rockwell</i>	R	80 a 110
Resistência ao impacto	J/m	5,3 a 100
Temperatura máxima de serviço	°C	120

O polímero PP pode ser distinguido em três tipos que englobam os Homopolímeros, os Copolímeros Estatísticos e os Copolímeros Alternados, cujo índice de fluidez pode variar entre as 0,6 e 100g/10min. Os Homopolímeros apresentam elevada cristalinidade, alta rigidez, dureza e resistência ao calor. Os Copolímeros Estatísticos são obtidos quando se adiciona ao propeno um segundo monômero (normalmente eteno) no reator, por consequência apresentam maior transparência, menor temperatura de fusão e são mais resistentes ao impacto em temperatura ambiente que os Homopolímeros. Os Copolímeros Alternados são produzidos por dois reatores em série, onde no primeiro se polimeriza somente o propeno e no segundo uma fase composta de propeno e eteno. Por apresentar, então, estas duas fases os Copolímeros Alternados perdem transparência, porém apresentam elevada resistência ao impacto tanto a temperatura ambiente como a baixas temperaturas. A escolha do tipo mais adequado à aplicação final deve ser baseada no desempenho requerido no uso final, mais do que do método de processamento aplicado. A Tabela 2-6 apresenta de forma simplificada os três tipos de polipropileno, onde se destacam os Copolímeros Alternados utilizados neste caso de estudo [36, 37].

Tabela 2-6: Classificação dos três tipos de Polipropileno [36, 37].

Grupo	Descrição
Homopolímeros	Obtidos exclusivamente por meio da polimerização do propeno. Apresentam excelente brilho e rigidez. São utilizados na produção de rafia para embalagens industriais, confecção de móveis plásticos e utilidades domésticas.
Comopolímeros Alternados ou Heterofásicos	Incorporam moléculas de eteno ao polímero. Apresentam excelente balanço de rigidez e resistência ao impacto. São utilizados na produção de peças para automóveis, embalagens rígidas e aplicações industriais.
Comopolímeros Estatísticos ou Randômicos	Incorporam de forma aleatória moléculas de eteno ao polímero. Apresentam excelentes propriedades óticas, como brilho e transparência, e menor temperatura de fusão. São utilizados na fabricação de utensílios domésticos e produtos que exigem alta transparência, como embalagens rígidas e utilidades domésticas de alta transparência e flexíveis para a indústria alimentícia.

De uma forma geral o polipropileno apresenta inúmeras vantagens tais como [36]:

- A densidade do polipropileno é uma das mais baixas de entre todos os polímeros, na ordem dos $0,905 \text{ g/cm}^3$, permitindo-lhe assim obter peças com baixo peso.
- Apresenta elevada rigidez, superior à da maioria dos plásticos comerciais.
- Boa resistência ao impacto a temperatura ambiente.
- Excelente transparência por contacto.
- Elevada resistência à fratura por fadiga ou flexão, sendo por isso muito aplicado em dobradiças.
- Alta dureza superficial.
- Elevada resistência química e a solventes.
- Baixa absorção de água.
- Baixa condutividade elétrica.
- Baixo custo.
- Fácil moldação.
- Boa estabilidade térmica.
- Maior sensibilidade à luz UV e a agentes de oxidação, degradando-se com maior facilidade.

Como desvantagens podem distinguir-se [36]:

- Pouca resistência ao impacto a baixas temperaturas.
- Baixa temperatura de fusão, desvantajoso em algumas aplicações.
- Baixa resistência à oxidação.

2.6.2 PP com Talco

O talco é utilizado como uma carga mineral, um mineral funcional, para melhoramento das propriedades físicas e químicas [43]. Pode ser apresentado em cor branca, cinza, azul, rosa ou preto [44]. Devido à sua estrutura cristalina, à textura laminar e ao comportamento reológico, os termoplásticos carregados com talco admitem maior rigidez, estabilidade térmica e dimensional [41].

O talco tem uma estrutura de camada dupla, tipo sanduiche, isto é, é formado por duas folhas sobrepostas como representado na Figura 2-35.

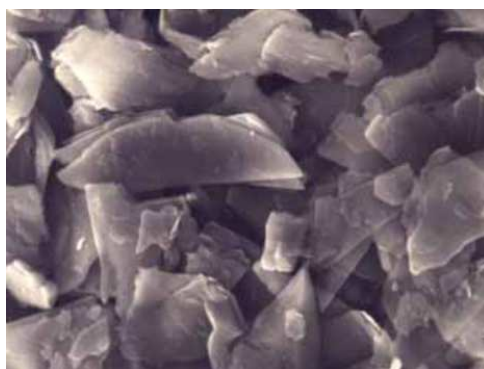


Figura 2-35: Textura laminar do talco [43].

O talco permite ainda um aumento da resistência do material contra à corrosão; aumenta a permeabilidade, resistência ao calor e à humidade; melhora a dureza e estabilidade dimensional; reduz o empeno das peças quando injetadas; proporciona um bom isolamento elétrico; retardamento de chama; aumenta a aderência à superfície metálica; é inodoro; insolúvel em água, em ácidos fracos e alcalinos e ajuda a reduzir o coeficiente de expansão térmica [38, 44].

A extração do mineral talco é feita por forma hidráulica, mecânica, manual ou com a ajuda de explosivos, antes de utilizado é sujeito a um tratamento químico e físico, onde é limpo, selecionado e preparado em matéria-prima [44].

Segundo Ciminelli deve-se ter em atenção a pureza do talco pois nele encontram-se alguns elementos que em excesso são prejudiciais ao polímero, tais como [43]:

- Dióxido de manganês como forte oxidante;
- Óxidos de cobre, níquel e ferro que provocam despolimerização e degradação de alguns polímeros;
- Óxidos de vanádio que atua como catalisadores na degradação do polímero;
- Impurezas solúveis e reativas que diminuem a resistência química e mecânica do plástico.

As suas principais aplicações são na indústria automóvel, mecânica e eletrônica [44].

No que refere às propriedades mecânicas o talco melhora o módulo de flexão e a resistência à tração, contudo diminui a percentagem de alongamento e a resistência ao impacto, como é possível concluir no estudo de Ferreira e Ciminelli [43, 44], apresentado na Tabela 2-7, onde o polímero é carregado com talco.

Tabela 2-7: Propriedades físicas de PP puro e PP com Talco, testado a 23°C [43, 44].

Propriedades	Polipropileno puro	Polipropileno com 40% de Talco
Módulo de flexão (GPa) ASTM D-790	1,60	4,10
Resistência à tração (MPa) ASTM D-638	38,6	37,2
Alongamento (%) ASTM D-638	8,5	3,1
Resistência ao impacto Izod/Charpy com entalhe (J/m ²) ASTM D-256A	31	22

2.6.3 ABS

O ABS é um polímero, um termoplástico, com base em terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno, Figura 2-36, produzido pela primeira vez em 1948 e padronizado pela IUPAC [45].

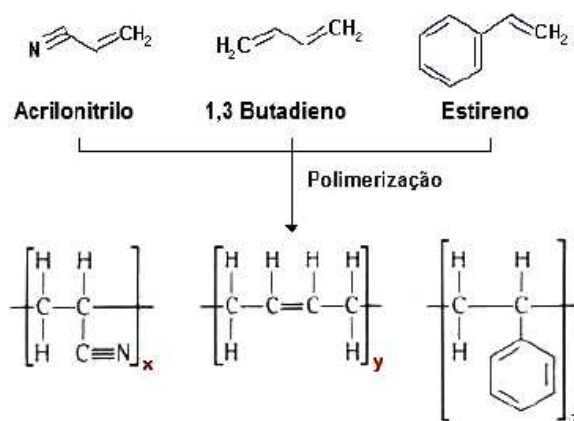


Figura 2-36: Estrutura molecular do ABS.

O polímero ABS admite uma temperatura de injeção de 180 a 250°C e uma temperatura de molde ideal, de 60 a 80°C [5]. A contração varia aproximadamente de 0,4 a 0,6%. Para além destas características, importantes para moldes de injeção, apresenta ainda as características apresentadas na Tabela 2-8 [42].

Tabela 2-8: Propriedades do ABS [42].

Propriedade	Unidades	Valor
Densidade	-	1,01 a 1,09
Módulo à flexão	MPa	1650 a 3110
Tensão de rotura	MPa	103 a 113
Alongamento na rotura	%	0,0 a 56
Dureza Rockwell	R	93 a 115
Resistência ao impacto	J/m	14.4 a 566
Temperatura máxima de serviço	°C	80

Tem um grau de viscosidade superior a muitos outros polímeros, por isso requer canais de distribuição perfeitos, de secção transversal superior, preferencialmente de forma circular. O ABS apresenta maior resistência à

temperatura, elevada resistência ao impacto e elevada resistência mecânica, contudo menor resistência ainda que inferior aos poliésteres de alto impacto [46] . É um material que permite uma fácil decoração com pintura e metálica por vácuo ou galvanização.

2.6.4 Gás de Azoto (Nitrogénio), N₂

O gás de azoto constituído por duas moléculas de nitrogénio (N₂ → N≡N), é um gás incolor e inodoro [47]. Não é combustível nem tóxico e comporta-se perante a maioria das substâncias como gás inerte diatómico, é pouco solúvel em água bem como na gordura dos alimentos. O azoto condensa (passa para o estado líquido) a uma temperatura de -195,8°C e congela (passa para o estado sólido) a -210°C.

O nitrogénio foi descoberto por Daniel Rutherford em 1772 e isolado em 1786 por Lavoisier [47].

78% do volume de ar respirável é composto por Nitrogénio, por isso mesmo encontra-se em grande abundância na atmosfera [47]. Pode ser também encontrado na crosta terrestre, em forma orgânica (por exemplo nas plantas) e em forma mineral.

No que se refere à sua aplicabilidade este encontra-se nas indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícias (embalagem, preservação e proteção da comida), do vidro, cimento, medicina, eletrónica, etc. [47].

O seu peso molecular é de 28,013g/mol, com uma densidade de 4,6096 kg/m³ (1,013bar em ebulição (-210°C)) e de 1,1848kg/m³ (1,013bar a 15°C) [47].

Capítulo 3

Projeto e fabrico do molde de injeção de placas em material polimérico

Para se poder caracterizar os materiais processados por injeção MuCell® foi projetado e fabricado um molde de 4 cavidades com o objetivo de se processarem placas em material termoplástico com e sem gás. As placas processadas tinham as seguintes dimensões: 100x100xh [mm³] e espessuras de 2 e 4 mm. O molde de canais frios foi projetado para ser utilizado na máquina *Sandretto* 610T equipada com tecnologia *MuCell*®.

Com base nos objetivos deste trabalho (caraterização mecânica de placas processadas em material polimérico com e sem gás), projeto do molde, complexidade das peças a obter, disponibilidade fabril e utilização de um sistema de injeção com recurso à tecnologia *MuCell*®, foram consideradas 5 semanas para execução do molde até ao 1º ensaio de injeção (T1 - primeiro teste). Este plano foi realizado tendo em conta, por um lado, materiais e acessórios existentes em *stock*, disponibilidades das máquinas para fabrico das peças e a disponibilidade da máquina de injeção. Após esta análise foi realizado um diagrama de *Gantt* (Figura 3-1) com recurso de *software GanttProject*.

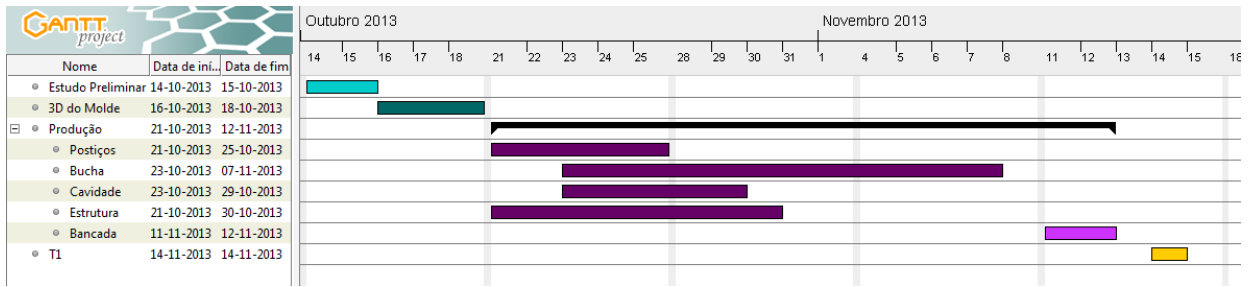


Figura 3-1: Diagrama de Gantt relativo ao plano de fabrico do molde.

Numa breve análise ao plano de fabrico do molde podem-se distinguir quatro etapas:

- Estudo preliminar: definição dos requisitos mecânicos necessários para que o molde funcione e se obtenha a as peças plásticas de acordo com os objetivos iniciais; elaboração de desenhos gerais do molde em 2D (tempo: 2 dias);
- Projeto 3D: o molde é modelado e são projetados/dimensionados/selecionados os vários sistemas que compõem o molde; (tempo: 3 dias);
- Fabrico do molde: maquinação dos vários componentes do molde, montagem, polimento e ajustamento (tempo: 23 dias, 17 dias úteis);
- Ensaio de injeção (teste): realização de ensaios em máquina de injeção equipada com sistema *MuCell*[®]; validação das peças plásticas processadas (tempo: 1 dia).

3.1 Estudo Preliminar

Segundo o estudo preliminar do molde a ser fabricado (Figura 3-2) cada placa pode ter três tipos de ataques com a possibilidade de serem abertos ou fechados, isto é, a injeção das placas poderá ser feita por apenas um dos ataques, por dois ou três canais, alternativamente, possibilitando enchimentos de sete maneiras diferentes. Para o sistema de extração foram considerados cinco extratores para cada placa. Como um dos objetivos é injetar placas com duas alturas distintas, foram consideradas buchas intermutáveis (duas versões).

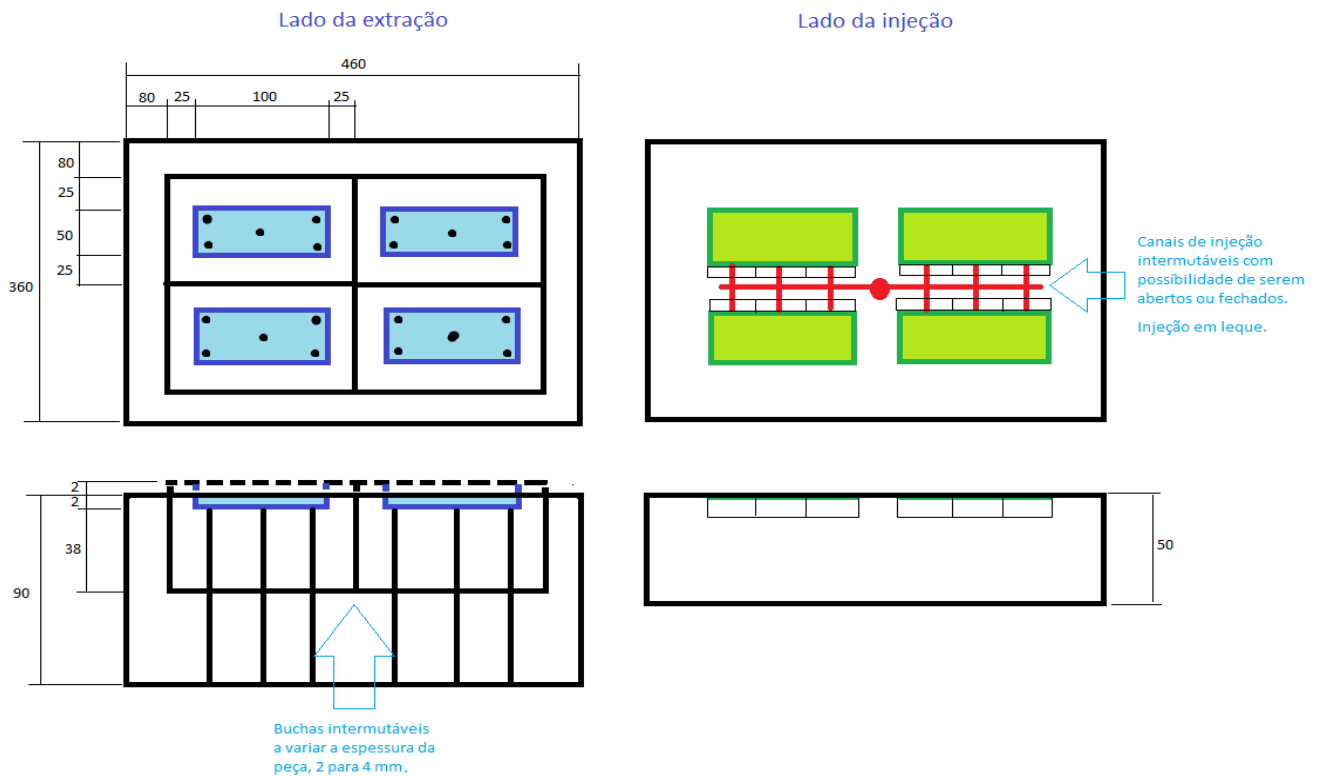


Figura 3-2: Estudo preliminar do molde para execução dos provetes.

3.2 3D do molde

Com o objetivo de minimizar custos, foi realizada uma análise dos recursos existentes na empresa para o fabrico do molde, nomeadamente a existência de aços. Tendo em conta os materiais existentes e, também, os fatores de sustentabilidade, para uma maior economia de recursos foi estudada a possibilidade de reaproveitar os materiais de um molde já existente.

A estrutura deste molde impossibilitou a execução do sistema de extração do molde a fabricar. No entanto, devido à geometria das peças, número de peças a processar e objetivos do trabalho a realizar, a extração das peças foi pensada ser manual. Os empenos que poderiam ocorrer devido à falta de extratores (sistema de extração, não se verificam, pois com a injeção de placas com gás o eventual empeno das peças deixou de existir. As peças processadas com gás (injetadas pelo método convencional) apresentam, naturalmente empenos, o que reforça a utilização do sistema de injeção *MuCell®*.

Para ser possível a maquinação do molde (e ter rigor dimensional) foi realizado o projeto 3D do molde (Figura 3-4 a Figura 3-6), com recurso ao *software ProE*. A cavidade do molde apresenta uma superfície negativa curva, (geometria esta

proveniente do molde anterior). No entanto, esta superfície foi posteriormente útil para se conseguir uma maior injeção de plástico, uma injeção mínima que possibilita-se a injeção do gás (ver capítulo 4.1.1). A bucha apresenta postigos intermutáveis que possibilitam o processamento de placas com 2 e 4 mm.

O molde sofreu algumas alterações após a realização dos primeiros ensaios na máquina de injeção (ver capítulo 4.1.1).



Figura 3-3: 3D do molde para a injeção das placas, vista do lado da injeção.



Figura 3-4: 3D do molde para a injeção das placas, vista do lado da cavidade.



Figura 3-5: 3D do molde: bucha.

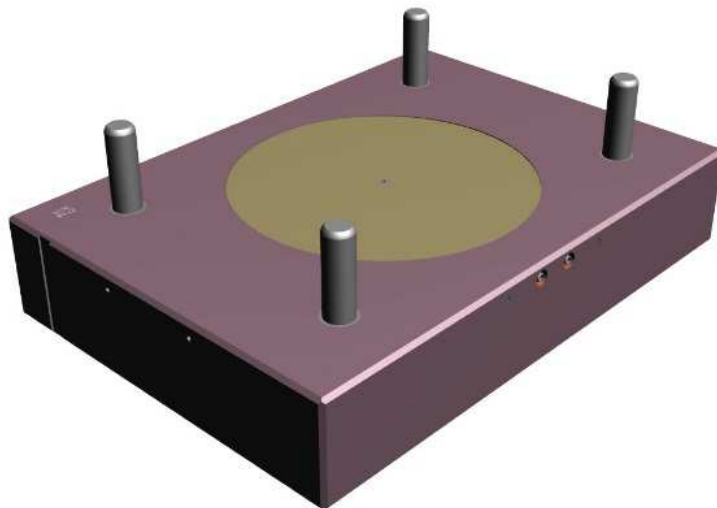


Figura 3-6: 3D do molde: cavidade.

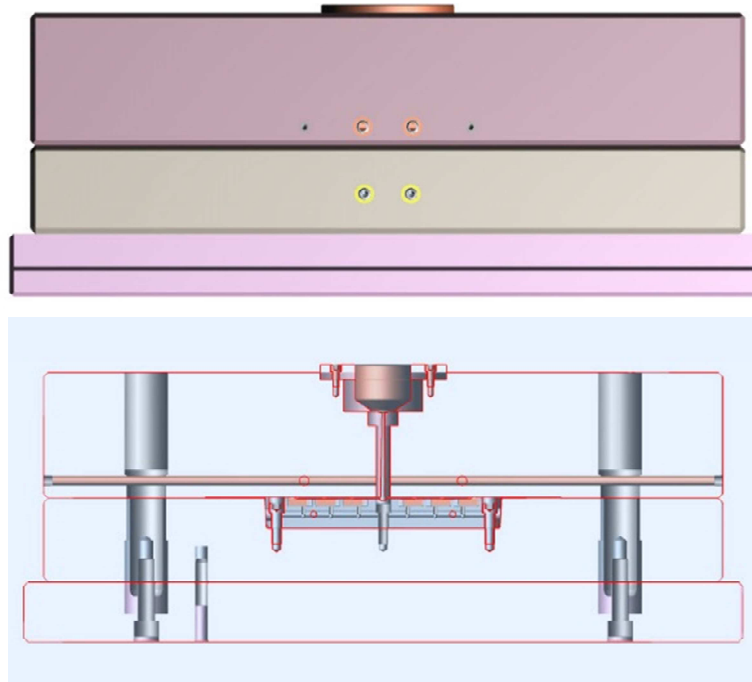


Figura 3-7: Vista em corte: molde para o processamento das placas.

Nas figuras (Figura 3-8, Figura 3-9 e Figura 3-20) podem ser observados os ataques, como referido no estudo preliminar, onde se pode ver um mecanismo que permite abrir ou fechar os ataques. Assim, é possível abrir ou fechar os três canais de cada peça separadamente e estudar a sua influência no enchimento da peça. Embora para as placas processadas, para este trabalho, tenham sido injetadas sempre com os três canais abertos, seria interessante, em termos de trabalhos futuros analisar a influência do tipo de ataque com recurso à tecnologia *MuCell*®.

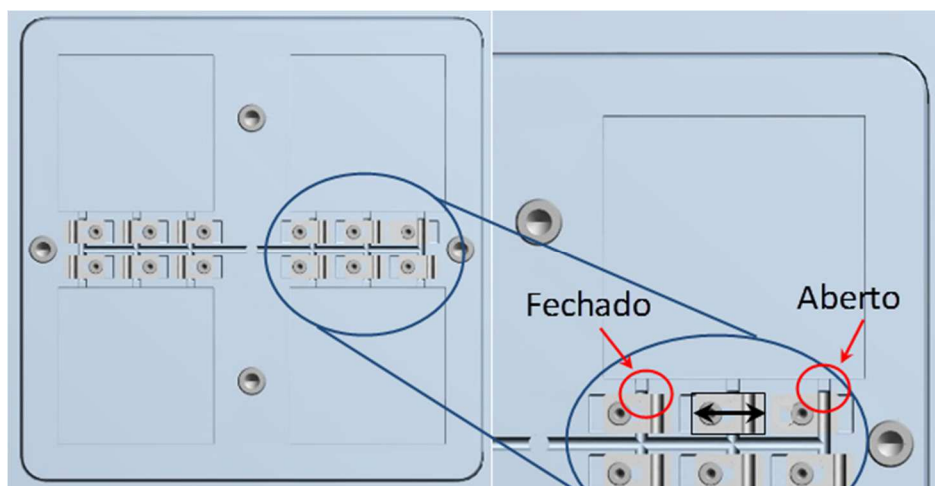


Figura 3-8: Pormenor de versões para os canais de injeção do molde para produção das placas.



Figura 3-9: Pormenor de versões para os canais de injeção do molde para produção das placas.

3.3 Produção do molde

Na produção de componentes estruturais de um molde podem-se considerar seis fases principais:

- Galgamento (Figura 3-10): maquinação de chapas para as dimensões finais;
- Desbaste (Figura 3-11) maquinação de componentes estruturais para dimensões não finais, de acordo os desenhos 3D do molde;
- Furação (Figura 3-12) maquinação de furos para o sistema de extração, sistemas de apertos, sistema de refrigeração, etc.;
- Retificação (Figura 3-13);
- Fresagem de acabamento (Figura 3-14), maquinação dos componentes para as dimensões finais;
- Electro erosão (Figura 3-159);
- Controlo dimensional de componentes (Figura 3-16).



Figura 3-10: Galgamento de uma peça em aço.



Figura 3-11: Desbaste de uma peça em aço.



Figura 3-12: Furação de uma peça em aço.



Figura 3-13: Retificação de uma peça em aço.

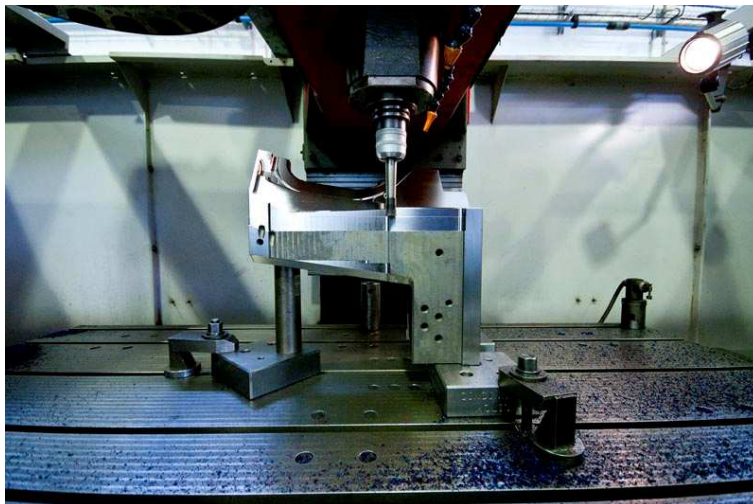


Figura 3-14: Acabamento de uma peça em aço.

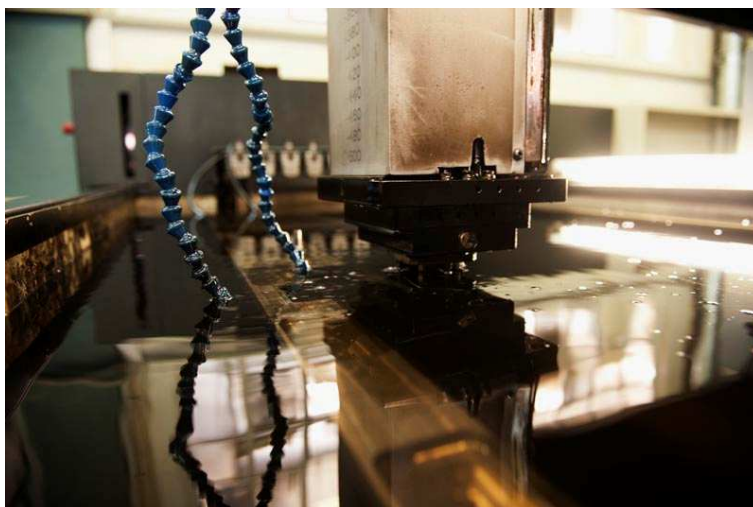


Figura 3-15: Erosão de uma peça em aço.



Figura 3-16: Controlo dimensional de uma peça em aço.

Muitas das etapas anteriormente referidas não foram executadas neste molde, pois o molde já existia e, deste modo, foram realizadas apenas alterações na bucha. Consequentemente foram maquinados dois postigos intermutáveis (buchas), Figura 3-17, com alturas de 2 e 4 mm. Por forma a fixar os postigos moldantes, foi maquinada uma caixa na chapa de fixação (Figura 3-18), onde os postigos foram ajustados. Os postigos foram maquinados em aço 1.2738, aço utilizado quando se pretende ter uma boa cadência e durabilidade (durezas de 28 a 32 HRC).



Figura 3-17: Postigos de zonas moldantes da bucha, em aço 1.2738, para molde de injeção das placas.

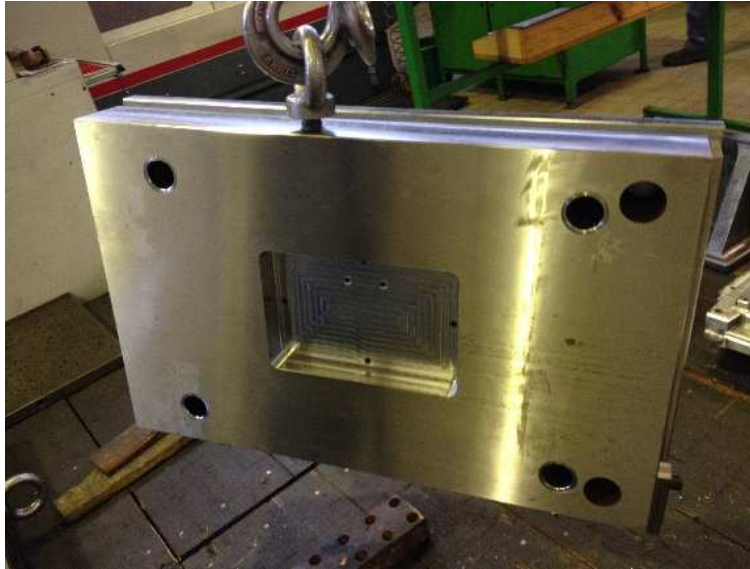


Figura 3-18: Chapa de fixação dos elementos moldantes.

Embora a zona de injeção do molde não sofresse alterações foi realizada uma avaliação (Figura 3-19), por forma a garantir o bom funcionamento do molde.

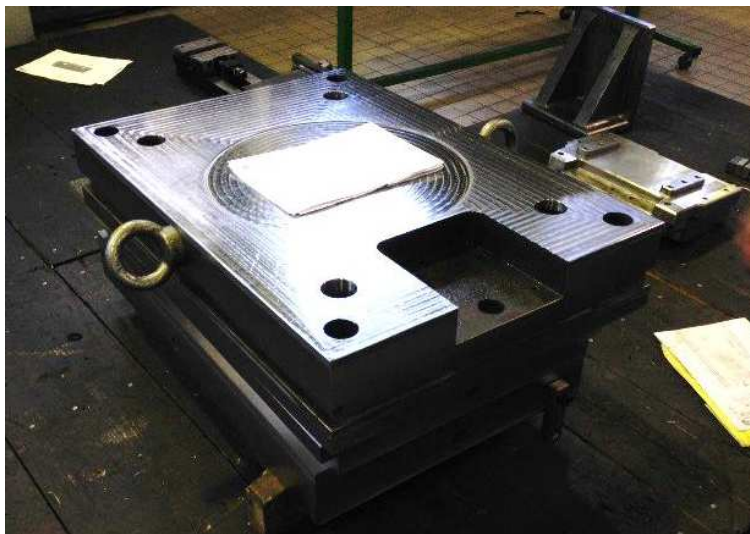


Figura 3-19: cavidade do molde de injeção (parte fixa do molde).

Após o fabrico das peças moldantes (postigos) estes foram naturalmente ajustados (Figura 3-20). O molde foi em seguida montado e afinado. Após esta fase, o molde foi montado na máquina de injeção.

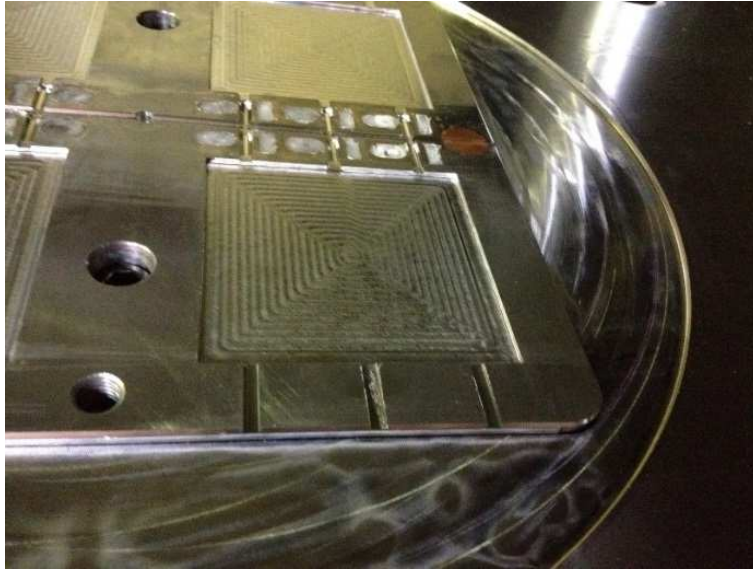


Figura 3-20: Postiço montado na zona móvel do molde.

Capítulo 4

Procedimentos experimentais

Neste capítulo são apresentadas os materiais utilizados no processamento por injeção, a geometria e as dimensões dos provetes bem como os procedimentos utilizados nos ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais processados.

4.1 Processamento de placas por injeção com recurso à tecnologia MuCell®

4.1.1 Injeção das placas em material polimérico (ABS, PP e PPTL) com gás (azoto)

A máquina utilizada no processamento das placas foi uma máquina *Sandretto Mega* de 610 T (Figura 4-1, Figura 4-2 e Figura 4-3), adaptada à injeção MuCell®, na qual foram processadas placas (com 2 e 4 mm) em PP natural, PP com talco e ABS e com diferentes percentagens de gás.



Figura 4-1: Máquina de injeção *Sandretto Mega* 610T.



Figura 4-2: Máquina de injeção Sandretto Mega 610T.

Os materiais poliméricos utilizados no processamento das placas foram os indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Materiais poliméricos utilizados no processamento por injeção.

Material	Fornecedor	T Trabalho	Cor
PP	Braskem	210-250	Natural
PP Talco	Styron	230-250	Preto
ABS	ExxonMobil	240-260	Natural

Na Tabela 4-2 são indicadas as datas de processamento das diferentes placas (ABS, PP e PPTL) com e sem gás (azoto).

Tabela 4-2: Datas de processamento das placas com diferentes materiais e diferentes percentagens de gás.

% N2	Esp.	PP Natural		PP Talco		ABS	
		2mm	4mm	2mm	4mm	2mm	4mm
0%		20-11-2013	22-11-2013	20-11-2013	22-11-2013	21-11-2013	21-11-2013
0,5%		20-11-2013	22-11-2013	20-11-2013	25-11-2013	11-06-2014	06-06-2014
0,6%						21-11-2013	06-06-2014
1%		11-06-2014	22-11-2013	20-11-2013	06-06-2014	11-06-2014	06-06-2014

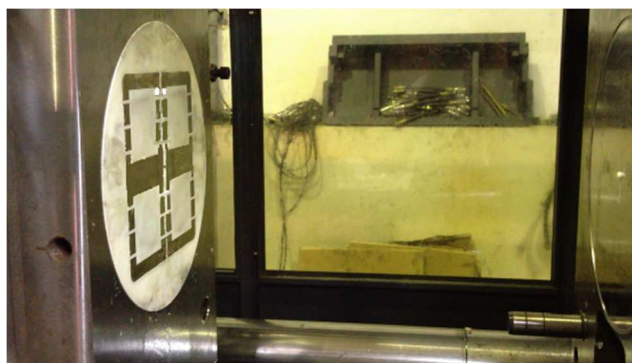


Figura 4-3: Produção placas em ABS com gás (4 placas).

O equipamento de injeção deverá assegurar um conjunto de funções imprescindíveis para a reprodutibilidade do ciclo de injeção (capítulo 2.1.1). Antes de ser possível obter placas completas foram necessárias definir e verificar algumas variáveis: sistema de injeção, verificação da viabilidade do sistema MuCell® agregado à máquina de injeção; definição da 1ª pressão; eliminação de 2ª pressão; afinação da almofada de material a injetar; temperatura de injeção; entre outras variáveis são descritas na Tabela 4-3.

Na máquina de injeção utilizada, para que o sistema de injeção de gás seja ativado o fuso deve ter no mínimo 15 mm do polímero base em carregamento, o que não se verificava na primeira versão do molde, Figura 4-4, onde se injetava apenas a geometria dos provetes. Nesta versão era conseguida apenas um terço do carregamento pretendido, aproximadamente 5 mm. Ora se a peça total, do molde da primeira versão, pesava sensivelmente 80gr, para que se conseguisse acionar o gás, na máquina em questão, dever-se-ia ter uma peça com um peso superior a 240 gr. Como tal, foram abertos três canais para a bolsa circular já existente em torno dos provetes para distribuição do material pela bolsa, Figura 4-5, aumentando-se assim o volume de injeção.

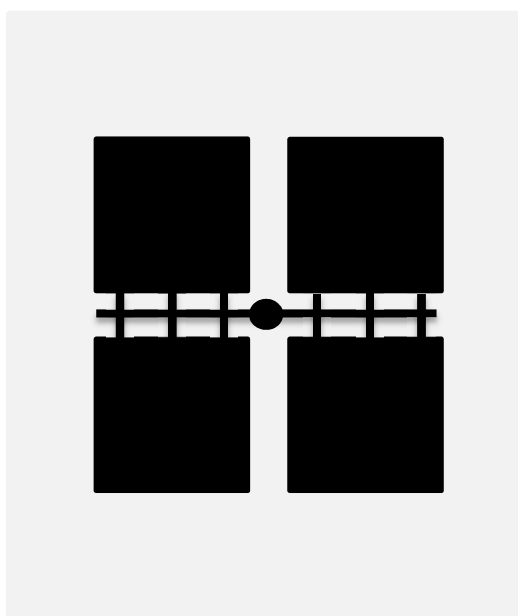


Figura 4-4: Primeira versão do molde.

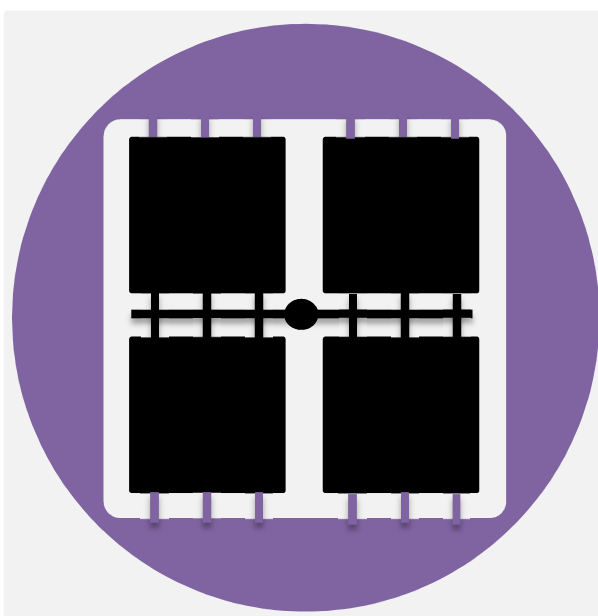


Figura 4-5: Segunda versão do molde.

Porém a segunda versão não apresentava ainda material suficiente, pois a bolsa circular criada não tinha espessura suficiente nem era totalmente preenchida, consequência esta causada pela profundidade insuficiente dos canais, que arrefeciam antes que a bolsa estivesse completa. Como resolução aprofundou-se a bolsa,

passando de uma espessura e 3mm para 5mm, aprofundaram-se os canais para que o material flui-se melhor e criaram-se dois canais extras no sentido dos canais principais de injeção para facilitar o enchimento da bolsa. Nesta terceira versão,

Figura 4-6, a peça com 300gr aproximadamente, tornava possível a ativação da injeção de gás.

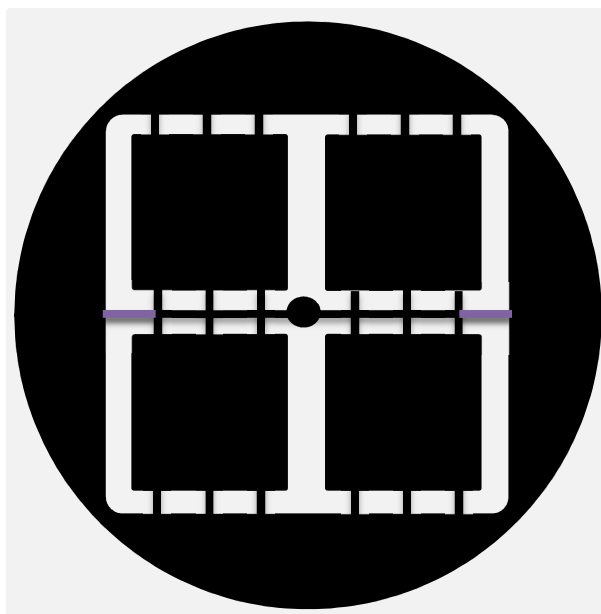


Figura 4-6: Terceira versão do molde.

Após a preparação da máquina para injeção *MuCell*® e melhoria do molde foi necessária a calibrar a máquina, no que respeita à injeção das peças. Foi injetada uma peça sem gás e sem segunda pressão, pois a segunda pressão será substituída pelo gás, e calculado o seu peso quando cheia. A peça cheia em material virgem tem um peso ≈ 300 gr (294gr), a peça cheia para *MuCell*®, admite um peso ≈ 270 gr de material virgem (sensivelmente -10% do valor quando cheia sem *MuCell*®, valor a colocar na máquina do sistema *MuCell*®). Os restantes 10% em falta na geometria da peça serão substituídos pelo gás, o que fará com que a peça final tenha um peso inferior, mas dimensões semelhantes.

A dosagem de gás para o interior do molde, por base na observação durante as produções, quando mal controlada, isto é, quando injetado gás a mais, face ao recomendável, as peças admitem o aspeto indesejável, com uma espessura muito fina, o não preenchimento completo da cavidade e com uma resistência a fratura muito baixa (quebradiças).

Para cada versão foram injetados um mínimo de 5 peças que faz um total de 20 provetes (100 por 100mm), todos os provetes foram etiquetados conforme as suas principais características. Para cada versão foi preenchido um relatório de experiência e a quando a injeção de gás um relatório denominado por “Teste com Gás *MuCell*®”. De forma resumida os parâmetros utilizados para os ensaios são descritos na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Parâmetros de injeção.

Material	Espessura mm	Parâmetros Máquina Injeção															Parâmetros MuCell							
		Injeção						Plastificação			Temperatura Processamento						Peso real da peça	Peso da peça	Gás		Polímero	Tempo de introdução de gás	Esquame nto nominal	
		1ª Injeção		2ª Injeção		Vel. Injeção	Dosagem	Passagem	Almofada	Contra-pressão	Vel.	Tempo Arrefecimento	Z1	Z2	Z3	Z4			Z5	%				gr	seg.	Kgs./hr.
Pressão Bar	Tempo Seg	Pressão Bar	Tempo Seg	%	mm%	mm%	mm%	Bar	Rpm	Seg	°C	°C	°C	°C	°C	gr	gr	%	gr	gr	seg.	Kgs./hr.		
PP	2	100	1,0	10	0,5	99	16,7	0,1	0,6	10	75	60	210	210	205	200	195	316	300	-	0,0	316,0	-	-
		100	1,0	10	0,5	99	16,7	0,1	0,6	10	75	60	210	210	205	200	195	278	270	0,5	1,4	276,6	8	0,61
		83	1,4	5	0,5	99	11,5	0,5	1	15	40	30	210	210	205	200	195		266	1			5	1,9
	4	100	1,0	44	3	99	30	9	5,5	8	30	60	240	245	230	215	205	380	387	-	0,0	380,0	-	-
		100	2,0	10	0,5	99	16,7	0,5	0,9	8	30	60	240	245	230	215	205	359	348	0,5	1,8	357,2	7	1,33
		100	2,0	10	0,5	99	16,7	0,5	0,9	8	30	60	240	245	230	215	205	357	348	1	3,6	353,4	7	1,33
PPTal	2	100	0,95	66	3	88	20	5	0,1	8	30	60	240	245	235	215	200	357	300	-	0,0	357,0	-	-
		100	1,78	10	1	66	11	0,5	1,4	8	30	60	235	240	235	215	200	306	270	0,5	1,5	304,5	8	0,61
		100	1,78	10	1	66	11	0,5	1,4	8	30	60	235	240	235	215	200	300	270	1	3,0	297,0	5	0,96
	4	100	1,1	33	3	99	30	9	7	8	30	60	240	245	230	215	205	416		-	0,0	416,0	-	-
		100	1,1	5	0,5	99	15	1	0,1	20	44	45	250	240	230	220	210		350	1	0,0	0,0	5,8	2,25
ABS	2	120	1,49	55	3	88	25	5	5	8	30	60	260	260	250	235	225	380	380	-	0,0	380,0	-	-
		150	1,38	5	0,5	99	14	0,5	0,4	10	55	30	265	260	250	240	220		332	0,5			4	1,48
		150	1,38	5	0,5	99	14	0,5	0,4	10	55	30	265	260	250	240	220		332	1			6,4	1,48
		120	0,8	10	0,5	99	15	0,5	0,1	8	30	60	260	260	250	235	225	372	350	0,6	2,2	369,8	6,5	0,96
	4	120	1,16	44	5	99	25	3	2	8	30	60	260	260	250	235	225	454	455	-	0,0	454,0	-	-
		110	0,97	5	0,5	99	19	1	1,7	15	44	30	265	260	250	240	220		400	0,5			3,2	2,25
		160	1,78	10	0,5	99	20	0,5	1	8	40	60	260	260	250	235	225	460	410	0,6	2,8	457,2	9	0,97
		160	1,78	10	0,5	99	20	0,5	1	8	40	60	260	260	250	235	225	450	410	1	4,5	445,5		

4.1.2 Preparação dos provetes

Para a realização dos ensaios de DMA e dos ensaios estáticos em flexão em três pontos, foram consideradas as geometrias, as dimensões dos provetes bem como o sentido do fluxo de injeção, conforme se pode observar na Figura 4-7 a) a d).

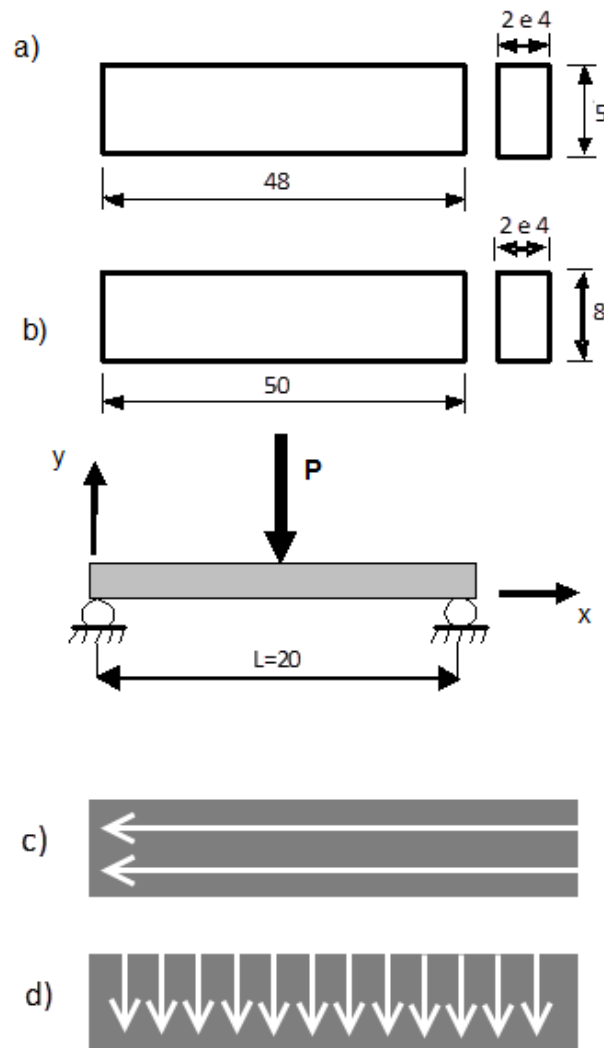


Figura 4-7: Geometria dos provetes em mm para: a) ensaios em DMA em flexão 3 pontos; b) ensaio de flexão em três pontos (e esquema de carregamento); c) direção de injeção (sentido paralelo (=)); d) direção de injeção (sentido perpendicular (t)).

O corte dos provetes foi realizado em duas etapas. Na 1ª etapa, a placa foi riscada por um bisturi (Figura 4-8), de acordo com a geometria pretendida. Na 2ª etapa, a placa foi partida pelo entalhe criado (Figura 4-9) com a aplicação de uma carga de flexão. Este procedimento foi utilizado de modo a ser possível visualizar as superfícies de fratura sem deformação plástica que poderia ocorrer se o processo utilizado fosse o corte por arranque de avara. Após esta fase, os provetes são

etiquetados, numerados e guardados para a realização dos respetivos ensaios (Figura 4-10).



Figura 4-8: Marcação das dimensões dos provetes.



Figura 4-9: Aplicação de carga à placa para se obter o provete.



Figura 4-10: Identificação dos provetes.

4.2 Ensaios mecânicos

4.2.1 Ensaio estático de flexão em três pontos

Com a realização dos ensaios de flexão em três pontos é possível determinar a tensão de rotura as propriedades mecânicas do material (tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão) [48]. Foram realizados quatro ensaios validos para cada tipo de material e foram obtidos os valores médios da tensão máxima e do módulo de elasticidade. Na determinação da tensão máxima à flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$) foi utilizada a seguinte equação [48]:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{fm\acute{a}x} \cdot h/2}{I} = \frac{3 \cdot P_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa] \quad (3.1)$$

onde: P_{max} é a carga, L o comprimento, b a largura e h a espessura (Figura 4-11). As equações 3.2 (cálculo do momento fletor máximo) e 3.3 (momento de inercia) foram utilizadas na determinação dos valores de tensão em flexão.

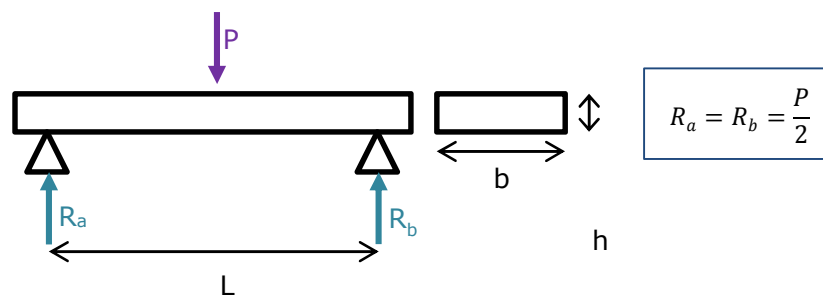


Figura 4-11: Representação esquemática do carregamento em flexão em 3 pontos.

$$M_{fm\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{2} \cdot \frac{L}{2} \quad (3.2)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade foi obtido a partir da equação 3.4 por regressão linear por:

$$Eu_{flex\tilde{a}o} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot I} \quad (3.4)$$

onde, P é a força e I o momento de inercia.

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados segundo a norma *ASTM D638* [49], numa máquina eletromecânica *Zwick/Z100* (Figura 4-12), à temperatura ambiente. Nos ensaios realizados, foi registada a força e o deslocamento, para uma velocidade de carregamento de 1mm/min. A máquina possui uma consola de controlo, conectado a um computador, o que permite introduzir dados e, também, visualizar o andamento da curva carga-deslocamento durante o ensaio, bem como o tratamento e armazenamento dos dados.

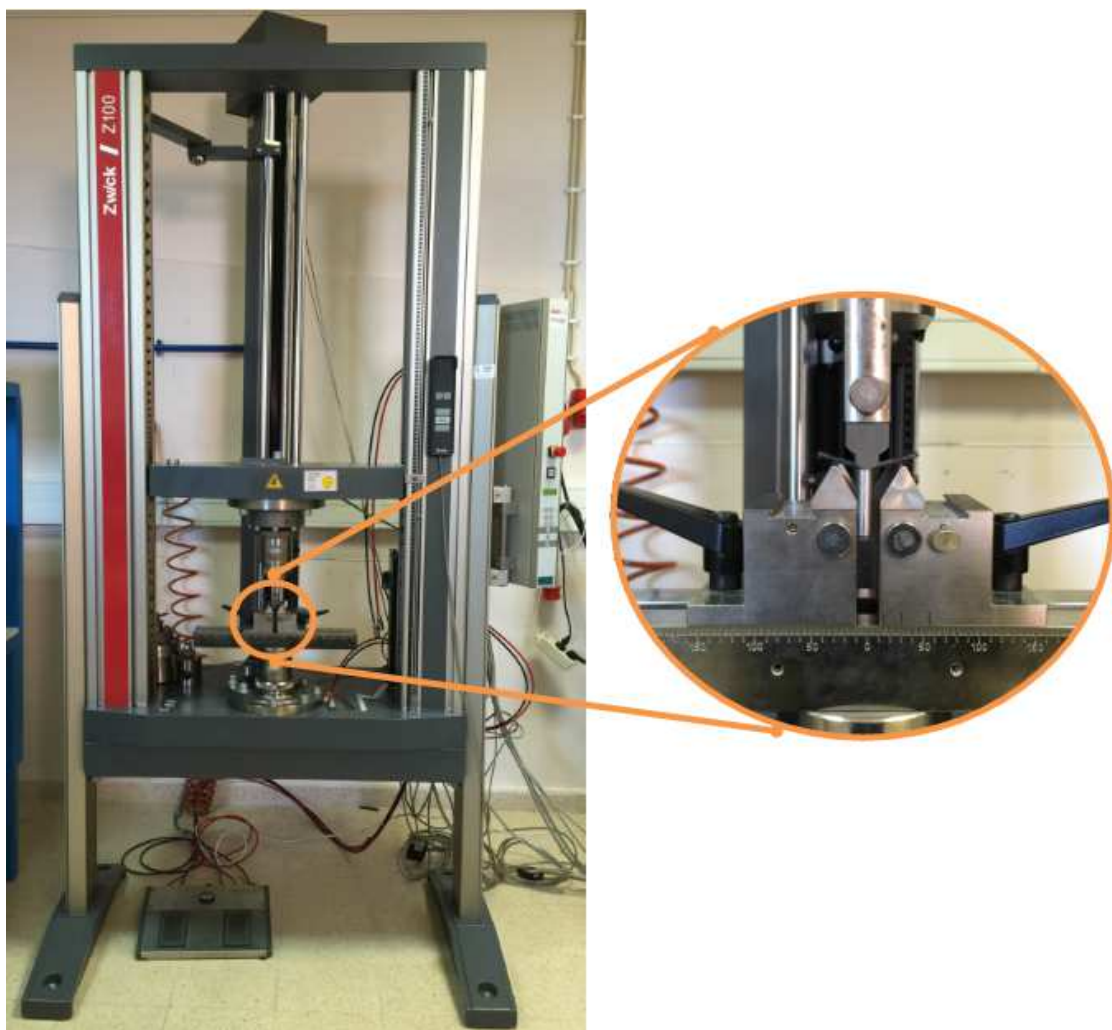


Figura 4-12: Máquina eletromecânica utilizada nos ensaios de flexão em três pontos.

4.2.2 Ensaio de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*)

Os ensaios de DMA, *Dynamic Mechanical Analysis*, são testes mecânicos em que é possível avaliar o comportamento mecânico de um material, sujeito a uma

temperatura controlada e sob uma força mecânica [50]. Este ensaio pode ser feito em diferentes modos de operação (Figura 4-13).

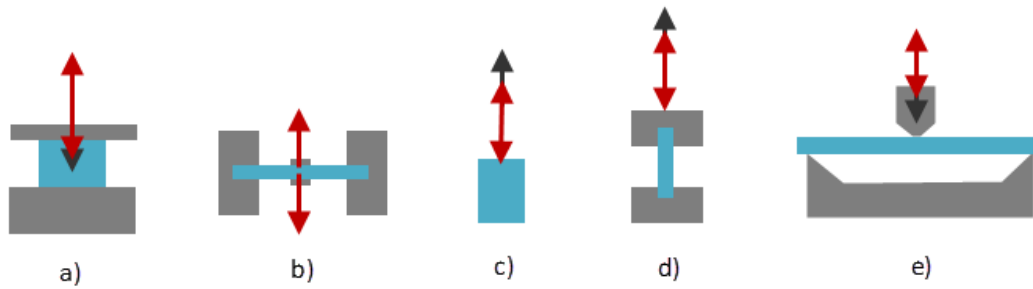


Figura 4-13: Módulos de operação de um conjunto DMA a) compressão; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração e e) flexão em três pontos.

Nos ensaios de DMA é, também possível obter os valores da temperatura de transição vítrea (T_g) dos materiais ensaiados.

Para realização dos ensaios foi utilizado um DMA (*Dynamics Mechanical Analysis*) TRITON, modelo *Tritec 2000*, Figura 4-14.

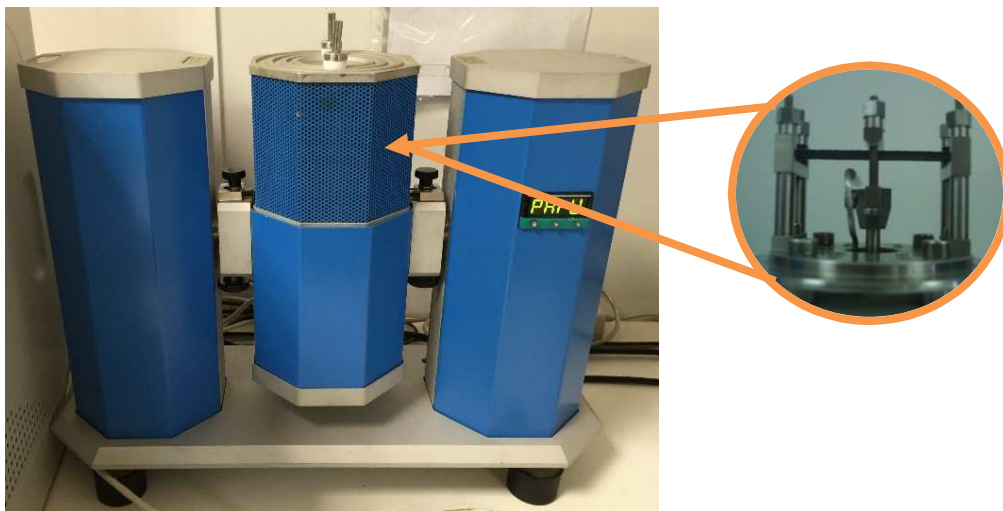


Figura 4-14: Equipamento DMA utilizado nos estudos, para ensaio de flexão em 3 pontos.

Os ensaios realizados foram em flexão em 3 pontos com variação de temperaturas entre os 20 e os 100 °C. A norma alemã DIN53457 é a referência neste tipo de análise térmica. Foram obtidos os módulos elásticos (*storage modulus* E_1) e viscosos (*loss modulus* E_2) e o coeficiente de dano (*tang*, δ , *damping* coeficiente). A partir dos resultados dos ensaios DMA é possível determinar as temperaturas de transição vítreas (T_g) dos materiais compósitos processados [51].

4.3 Cálculo da Densidade

A densidade foi obtida com recurso a uma balança de precisão eletrónica, *Mettler Toledo* (Figura 4-15). Foram utilizadas três medições para cada material, à temperatura ambiente e obtidos os valores médios (g/cm^3) e os desvios padrão.



Figura 4-15: Balança de precisão eletrónica para cálculo de densidades.

Capítulo 5

Resultados e análise de resultados

5.1 Análise estrutural das placas injetadas com a tecnologia *MuCell*®

Foram processadas por injeção com recurso à tecnologia *MuCell*®, placas em material termoplástico com diferentes percentagens de gás. Por forma a analisar o tipo de estruturas obtidas nas secções das placas injetadas com a tecnologia *MuCell*®, estas foram fraturadas com a aplicação de carga em flexão. As secções das amostras obtidas foram, posteriormente, analisadas com recurso a um microscópio (marca *Zeiss*; máquina fotográfica acoplada *Canon PowerShot A640*; lente de 5x/0,15). Da análise das fotos das várias amostras obtidas foi selecionada (Figura 5-1) representativa do processo de injeção *MuCell*®. A partir da análise da Figura 5-1 é possível destacar 4 zonas distintas:

- Camada superficial de polímero em contacto com o molde (superfície moldante) - Esta camada, está presente nas extremidades das seções das placas (zona sem gás);
- Zona comprimida pelo gás - Zona com visível deformação plástica e com eliminação quase total das bolhas, deformação essa provocada pelo corte da lâmina prévio à aplicação da carga fletora que parti-o as placas;
- Zona intermédia - Zona onde é alguma deformação das bolhas;
- Zona de expansão do gás - nesta zona, o gás têm maior liberdade de expansão e desenvolvem-se bolhas que comprime o material polimérico envolvente.

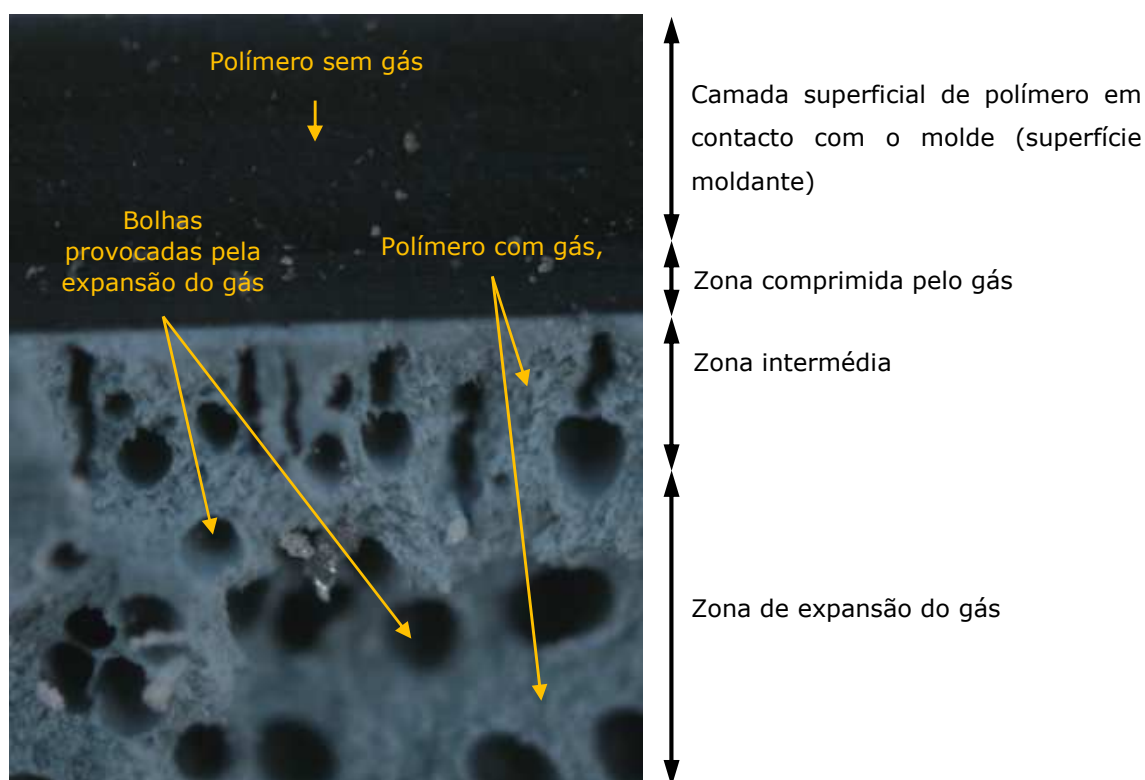


Figura 5-1: Foto representativa da seção de uma amostra processada por injeção com à tecnologia *MuCell*®.

5.2 Densidades

Na Figura 2-1, é possível observar os valores médios das densidades dos materiais estudados com e sem gás. Com a adição de gás verifica-se uma natural diminuição da densidade. Materiais com maior espessura (provetes com 4 mm) podem, em geral, ter uma maior expansão das bolhas, logo a placa resultante da injeção terá menos peso para o mesmo volume de material. As amostras de material sem gás admitem valores um pouco inferiores aos teóricos, influenciados pela não existência de segunda pressão na injeção das placas (menor compactação ou 2ª pressão). Os resultados obtidos com adição de gás apresentam uma descida média de densidade na ordem dos 6,1% e de 2,4%, respetivamente, para 0,5 e para 1 % de gás.

O PP com a adição de gás é o material que apresenta uma maior variação da densidade, apresentando uma variação mínima de 6,4% para o PP com 2 mm de espessura e 0,5% de gás e, para o provete de 4 mm de espessura e 1% de gás, obteve-se uma variação máxima de 16%.

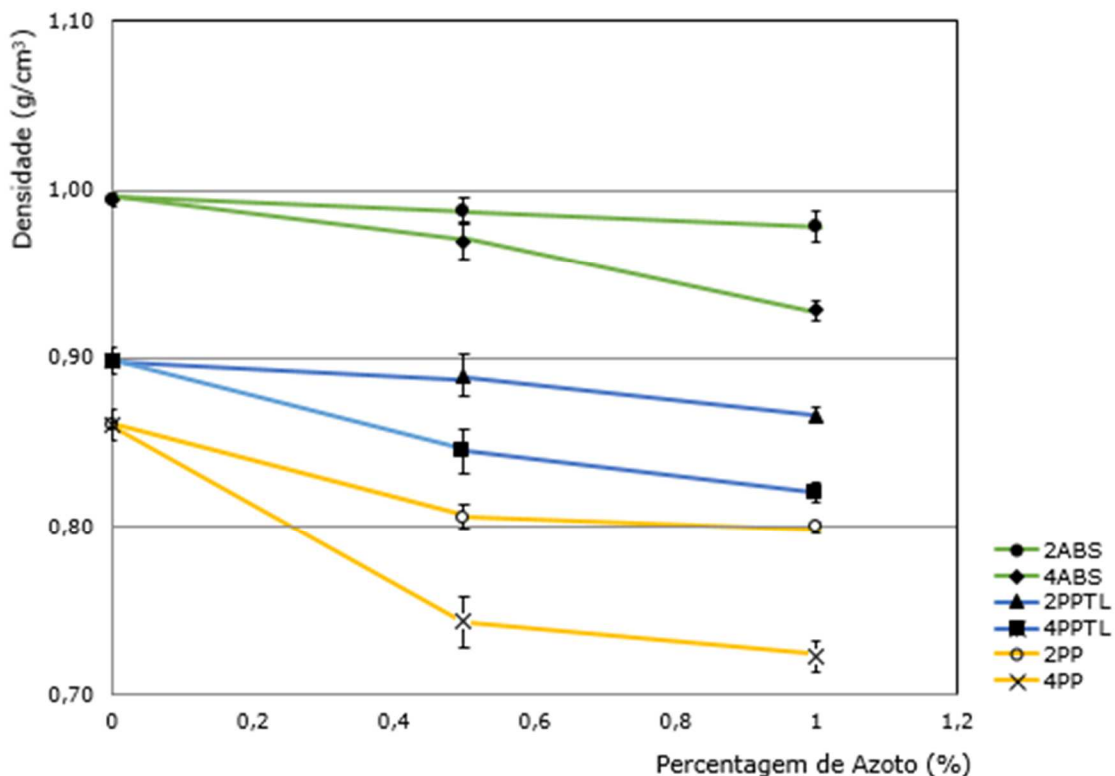


Figura 5-2: Valores de densidade dos diferentes materiais estudados versus percentagem de gás.

5.3 Ensaios estáticos em flexão em três pontos

Os materiais termoplásticos com e sem gás, injetados com recurso à tecnologia *MuCell®*, foram sujeitos a ensaios estáticos em flexão em 3 pontos por forma a determinar as propriedades mecânicas. Como resultado destes ensaios, foram obtidos os valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade para os diferentes materiais com e sem gás (Tabela 5-1).

Tabela 5-1: Resultados relativos aos ensaios de flexão em três pontos realizados com os diferentes materiais processados por injeção sem e com gás (tecnologia *MuCell®*).

Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]	Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]	Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]
PP=	0	35,97	0,65	PPTL=	0	38,70	1,25	ABS=	0	106,86	2,61
		35,69	0,70			44,00	1,73			103,54	2,51
		34,80	0,63			48,30	1,79			101,15	2,37
		35,81	0,75			40,40	1,46			109,07	2,62
	\dot{x}	35,75	0,68		\dot{x}	42,20	1,60		\dot{x}	105,20	2,56
DP	0,52	0,05	DP	4,25	0,25	DP	3,51	0,12			
PP †	0	33,89	0,72	PPTL †	0	35,00	1,38	ABS †	0	106,49	2,59
		32,47	0,63			39,60	1,25			100,60	2,45
		35,89	0,73			37,00	1,48			104,83	2,56
		31,47	0,75			34,30	1,18			90,46	2,48
	\dot{x}	33,18	0,72		\dot{x}	36,00	1,31		\dot{x}	100,60	2,52
DP	1,92	0,05	DP	2,38	0,13	DP	7,20	0,07			
2PP=	0,5	28,91	0,76	2PPTL=	0,5	28,30	0,96	2ABS=	0,5	56,54	0,88
		30,19	0,68			29,10	1,11			62,94	0,91
		28,48	0,77			28,30	0,96			58,01	0,83
		33,18	0,69			28,80	0,98			69,36	0,96
	\dot{x}	29,55	0,73		\dot{x}	28,55	0,97		\dot{x}	60,48	0,89
DP	2,12	0,05	DP	0,39	0,07	DP	5,79	0,05			
2PP †	0,5	26,27	0,32	2PPTL †	0,5	23,60	0,85	2ABS †	0,5	57,40	0,89
		25,63	0,31			23,50	0,70			61,35	0,90
		27,39	0,44			26,10	0,85			59,72	0,85
		28,68	0,36			23,90	0,87			57,35	0,80
	\dot{x}	26,83	0,34		\dot{x}	23,75	0,85		\dot{x}	58,56	0,87
DP	1,34	0,06	DP	1,23	0,08	DP	1,94	0,04			
2PP=	1	24,51	0,33	2PPTL=	1	20,51	0,43	2ABS=	1	55,95	0,79
		24,67	0,37			23,55	0,39			56,96	0,86
		23,07	0,27			23,87	0,43			53,05	0,75
		25,79	0,33			20,35	0,38			54,51	0,78
	\dot{x}	24,59	0,33		\dot{x}	22,03	0,41		\dot{x}	55,23	0,78
DP	1,12	0,04	DP	1,90	0,02	DP	1,71	0,05			
2PP †	1	25,63	0,32	2PPTL †	1	20,67	0,43	2ABS †	1	53,99	0,74
		21,79	0,31			19,55	0,27			54,35	0,77
		24,51	0,32			18,58	0,29			55,38	0,81
		24,19	0,30			18,66	0,37			55,43	0,80
	\dot{x}	24,35	0,32		\dot{x}	19,11	0,33		\dot{x}	54,87	0,78
DP	1,62	0,01	DP	0,97	0,07	DP	0,73	0,03			

Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]	Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]	Mat.	% gas	$\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	E [GPa]
4PP=	0,5	24,23	0,25	4PPTL=	0,5	22,23	0,35	4ABS=	0,5	45,38	0,56
		22,63	0,23			23,43	0,33			44,16	0,55
		22,51	0,23			15,42	0,22			46,53	0,58
		24,03	0,25			17,58	0,27			45,20	0,57
	\bar{x}	23,33	0,24		\bar{x}	19,91	0,30		\bar{x}	45,29	0,56
DP	0,91	0,01	DP	3,79	0,06	DP	0,97	0,01			
4PP ⊥	0,5	22,51	0,24	4PPTL ⊥	0,5	18,26	0,27	4ABS ⊥	0,5	43,02	0,55
		15,94	0,14			18,14	0,26			42,22	0,59
		17,06	0,16			18,62	0,31			14,71	0,59
		19,58	0,18			17,30	0,26			13,99	0,55
	\bar{x}	18,32	0,17		\bar{x}	18,20	0,26		\bar{x}	42,62	0,57
DP	2,92	0,04	DP	0,56	0,03	DP	0,57	0,02			
4PP=	1	23,95	0,23	4PPTL=	1	15,58	0,22	4ABS=	1	41,23	0,55
		23,39	0,24			18,58	0,23			45,43	0,57
		21,83	0,20			17,10	0,23			42,94	0,56
		23,21	0,24			14,98	0,20			42,43	0,53
	\bar{x}	23,30	0,23		\bar{x}	16,34	0,22		\bar{x}	42,69	0,55
DP	0,90	0,02	DP	1,62	0,02	DP	1,77	0,02			
4PP ⊥	1	18,95	0,17	4PPTL ⊥	1	14,02	0,19	4ABS ⊥	1	39,01	0,51
		18,86	0,18			14,86	0,21			39,24	0,50
		16,54	0,13			17,18	0,29			44,09	0,56
		16,94	0,15			13,30	0,18			40,29	0,53
	\bar{x}	17,90	0,16		\bar{x}	14,44	0,20		\bar{x}	39,77	0,52
DP	1,26	0,02	DP	1,69	0,05	DP	2,36	0,03			

Nas figuras seguintes, Figura 5-3, Figura 5-5 e Figura 5-7, são apresentados os valores de tensão máximos para os diferentes materiais processados e ensaiados. A partir da análise destas figuras, pode-se observar que os materiais sem gás apresentam, naturalmente, valores de tensão máxima superiores aos materiais processados com gás. Por outro lado, pode-se observar que no caso dos provetes com fluxo longitudinal, estes apresentam também valores de tensão máxima superiores aos que tem fluxo no sentido transversal. O ABS é o material que apresenta maiores valores de tensão máxima em flexão em 3 pontos mas, também, o que apresenta maior variação dos valores de tensão máxima com a adição de azoto.

A simbologia utilizada nas diferentes figuras refere-se ao “tipo de material, espessura do provete, sentido do fluxo e % de gás”, como por exemplo: “PP2=0” é um polipropileno, com 2 mm de espessura, de fluxo longitudinal e 0% de gás (neste exemplo particular sem gás).

O polipropileno, Figura 5-3, tem uma queda de tensão média de 31,8% relativamente ao material sem gás. A diminuição de resistência mecânica máxima de 48,1% no material com 1% de gás, 4mm de espessura e sentido perpendicular do fluxo de processamento. Já o PP com 0,5% de gás, 2mm de espessura e sentido

paralelo do fluxo de processamento apresenta, naturalmente, a menor diminuição de resistência mecânica 14,3%.

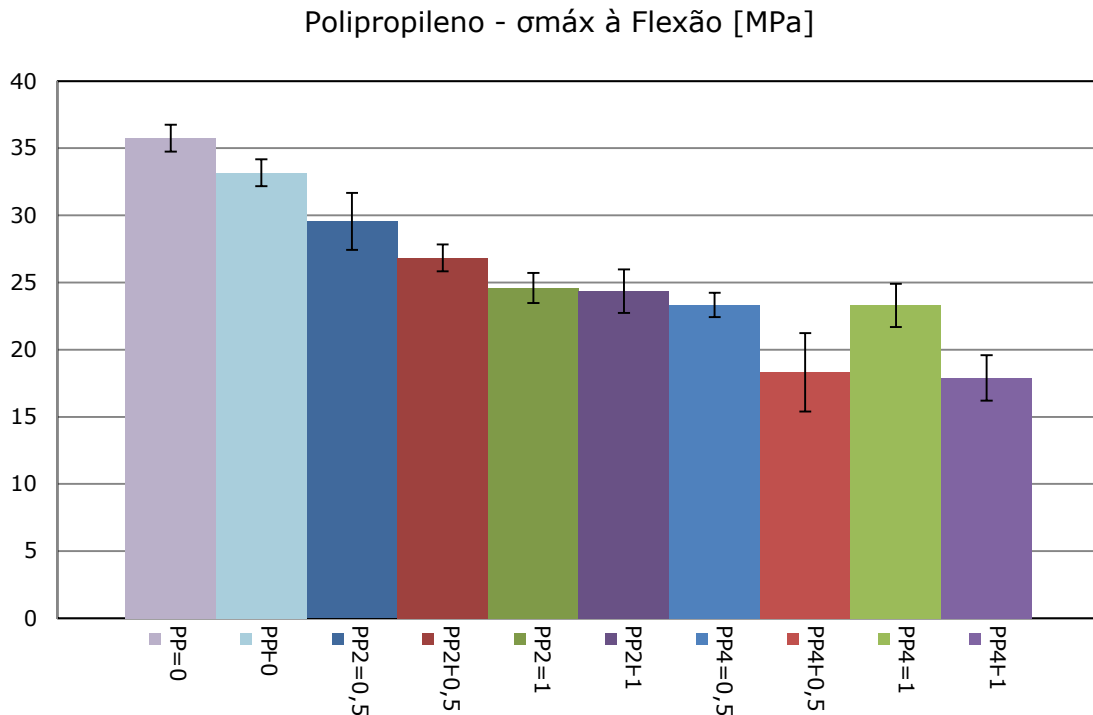


Figura 5-3: Resultados de tensão para provetes em PP processados com e sem gás.

Na Figura 5-4 são apresentadas as seções de fratura dos provetes de PP com diferentes percentagens de gás (0,5% e 1%) e diferentes espessuras (2 e 4 mm). Com o aumento de gás para 1% (fotos c), e), g), i)) é possível observar uma maior densidade de bolhas de gás o que se traduz, naturalmente, numa diminuição da resistência mecânica (materiais processados com maior percentagem de gás). Nas fotos relativas às amostras com 4 mm de espessura (fotos f) a i)) pode-se observar um maior número de bolhas, o que pode ter como consequência menores propriedades mecânicas.

Um outro fator que se observável nas fotos é o sentido do fluxo das amostras (direção do fluxo que resulta do processamento das placas). No caso das amostras b), c), f) e g), com direção de fluxo paralelo, é possível observar que as bolhas têm tendencialmente uma direção horizontal. No caso das amostras d), e), h) e i), de fluxo perpendicular, as bolhas apresentam uma direção vertical.

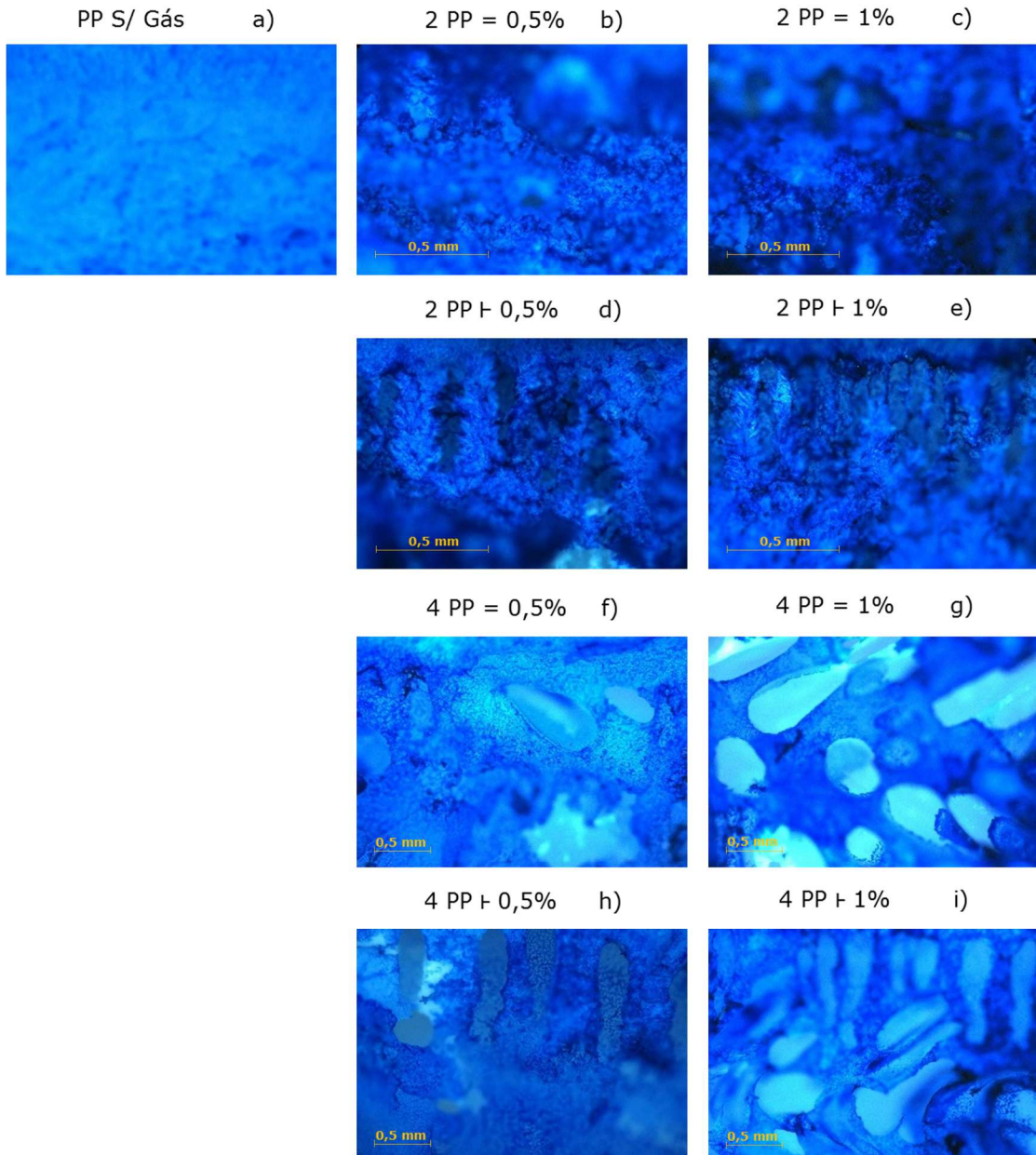


Figura 5-4: Fotos relativas às seções de fratura dos provetes em PP com diferentes percentagens de gás (0,5% e 1%) e diferentes espessuras (2 e 4 mm).

O polipropileno com talco, Figura 5-5, apresenta uma maior diminuição da resistência mecânica face ao polipropileno sem aditivo, apresentando uma diminuição da tensão média de 48,1% relativamente ao material sem gás. Para o material com 1% de gás, 4mm de espessura e sentido perpendicular do fluxo de processamento é visível uma queda de tensão de 63,1%. O material com uma percentagem de gás de 0,5%, 2mm de espessura e sentido paralelo do fluxo de processamento exibe, naturalmente, a menor diminuição de resistência de 27%.

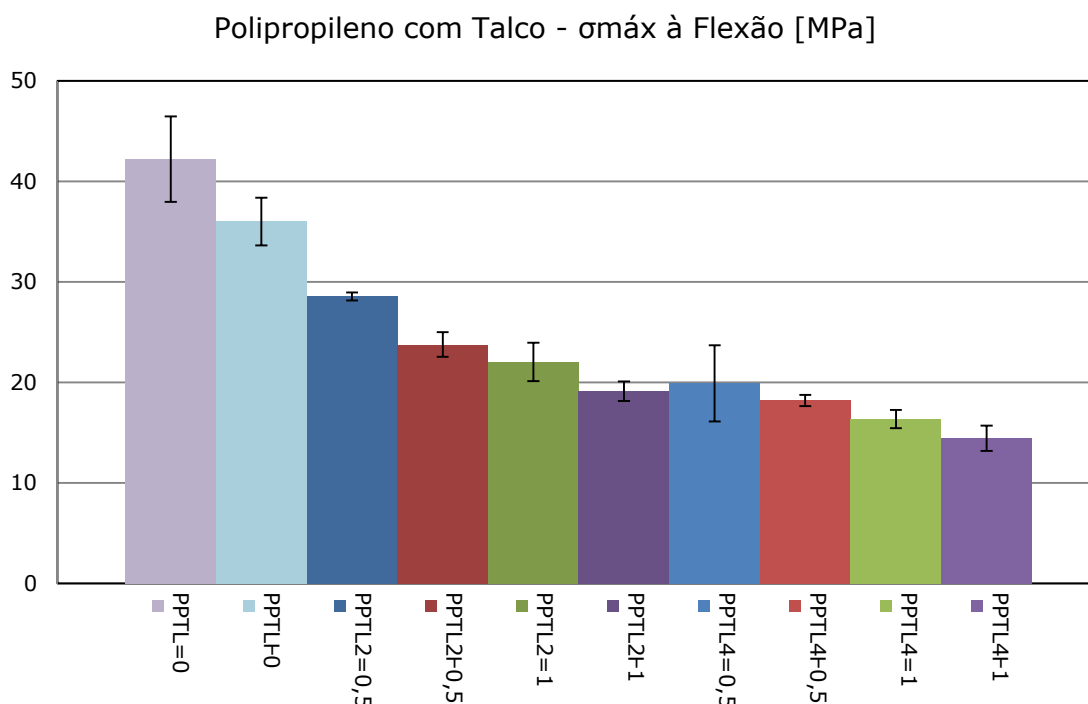


Figura 5-5: Resultados de tensão para provetes em PP com Talco processados com e sem gás.

Na Figura 5-6 são apresentadas fotos das superfícies de fratura dos provetes de PP com Talco com diferentes percentagens de gás (0,5% e 1%) e diferentes espessuras (2 e 4 mm). É, também possível observar neste caso que com o aumento de gás para 1% (fotos c), e), g), i)) se observa uma maior densidade de bolhas, o que vai ter como consequências uma diminuição da resistência mecânica do material. Nas fotos g) e i) pode-se observar bolhas de inferior diâmetro que as bolhas relativas às amostras f) e h), as primeiras, com maior percentagem de gás, como já referido, têm no entanto uma maior densidade de bolhas, o que se traduz numa inferior resistência mecânica. Nas fotos relativas às amostras de 4 mm (fotos f) a i)) pode-se observar um aumento da densidade das bolhas. Embora, com alguma dificuldade, possível distinguir o sentido do fluxo nas fotos dos vários materiais processados. As amostras b), c), f) e g) de fluxo paralelo e as fotografias d), e), h) e i), de fluxo perpendicular, que apresentam um menor comportamento mecânico.

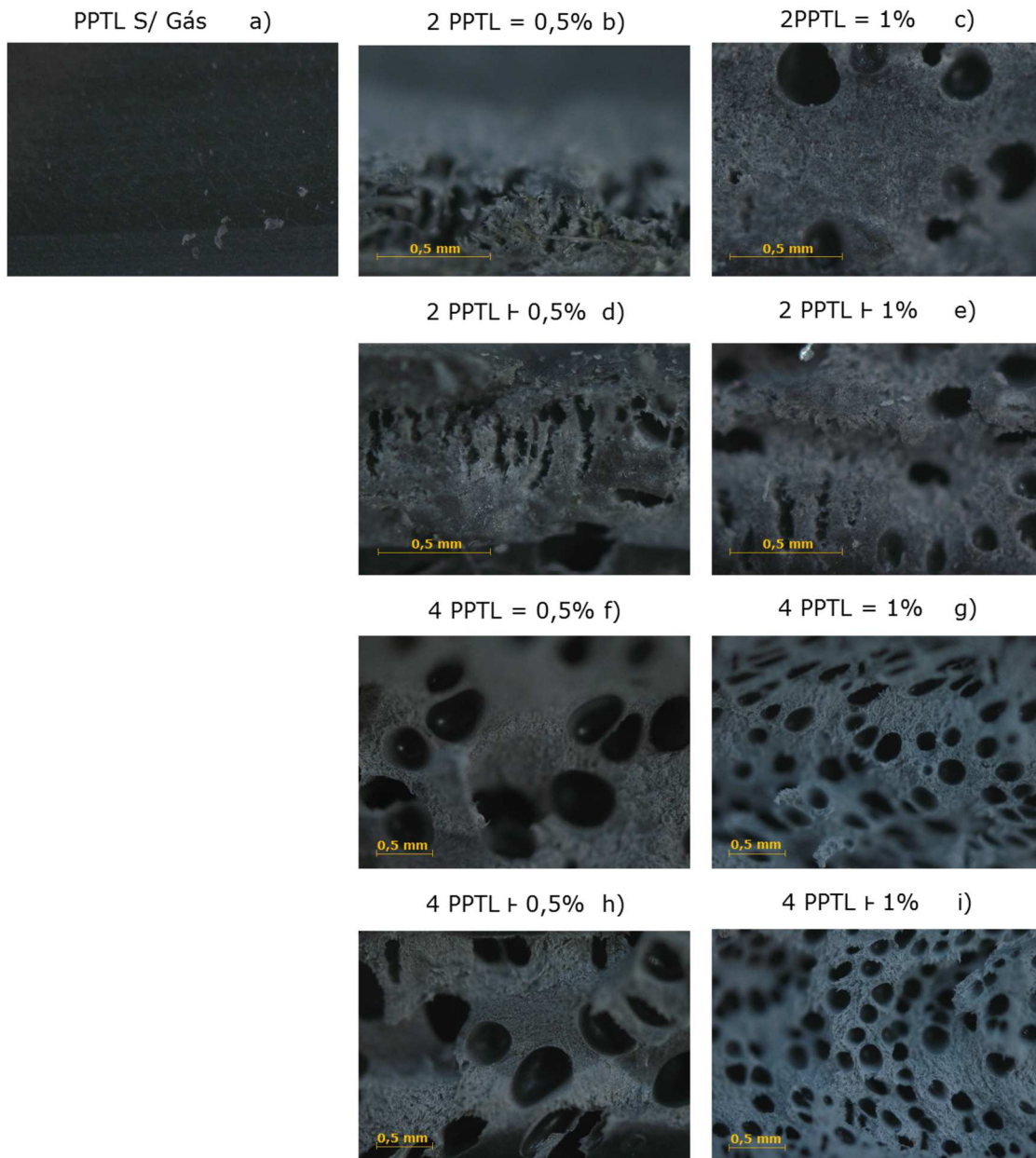


Figura 5-6: Fotos das superfícies de fratura dos provetes do PPTL com diferentes percentagens de gás (0,5% e 1%) e diferentes espessuras (2 e 4 mm).

O acrilonitril0-butadieno-estireno (Figura 5-9) apresenta a maior diminuição de resistência mecânica (51,5%), relativamente ao material ABS sem gás e, apresenta uma diminuição de 41,2% relativamente ao material com 0,5% de gás, com 2mm de espessura e sentido paralelo ao fluxo de processamento. No caso do material com 1% de gás, com 4mm de espessura e sentido perpendicular do fluxo de processamento, apresenta o valor máximo de resistência mecânica de 61,4%.

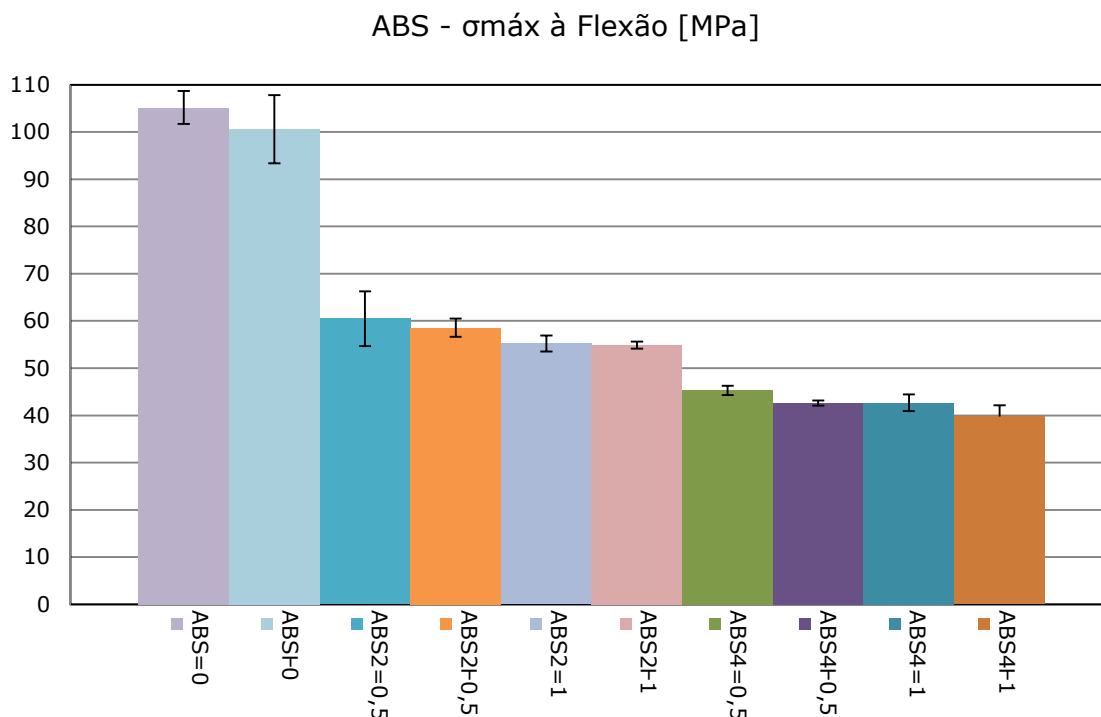


Figura 5-7: Resultados de tensão para provetes em ABS com Talco processados com e sem gás.

O ABS apresenta uma distribuição das bolhas muito irregular, como se pode observar na Figura 5-8, onde são apresentadas fotos relativas às superfícies de fratura dos provetes de ABS com diferentes percentagens de gás. Com o aumento de gás de 0,5% para 1% é possível observar um aumento (com alguma desorganização da densidade das bolhas (fotos b), d), f) e g) e fotos c), e), g) e i), respetivamente) e, conseqüentemente, obteve-se uma diminuição da resistência mecânica. Nas fotos relativas às amostras de 4 mm de espessura (fotos f) a i)) pode-se observar um aumento da densidade das bolhas.

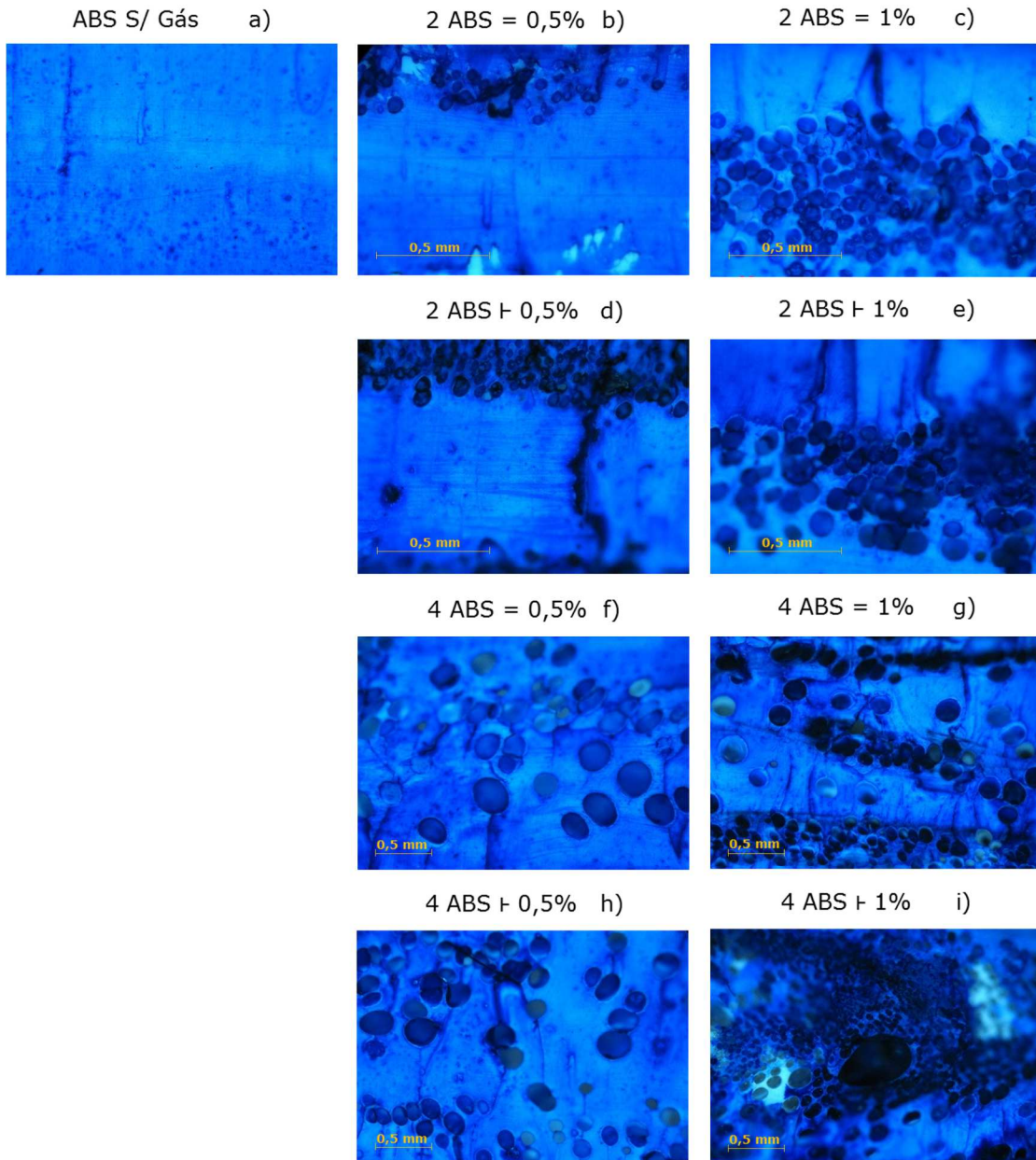


Figura 5-8: Fotos relativas às superfícies de fratura dos provetes do ABS com diferentes percentagens de gás (0,5% e 1%) e diferentes espessuras (2 e 4 mm).

Nas figuras seguintes (Figura 5-9, Figura 5-10 e Figura 5-11), são apresentados os resultados relativos aos valores de módulo à flexão em 3 pontos (obtidos por regressão linear), para os diferentes materiais processados com e sem gás (sentido longitudinal (=) e transversal (⊥)). É possível observar, uma vez mais, que os materiais sem gás e com fluxo longitudinal, apresentam valores de módulo superiores aos materiais processados com gás e fluxo no sentido transversal. A adição de gás diminui o módulo em cerca de 60%, face aos materiais sem gás.

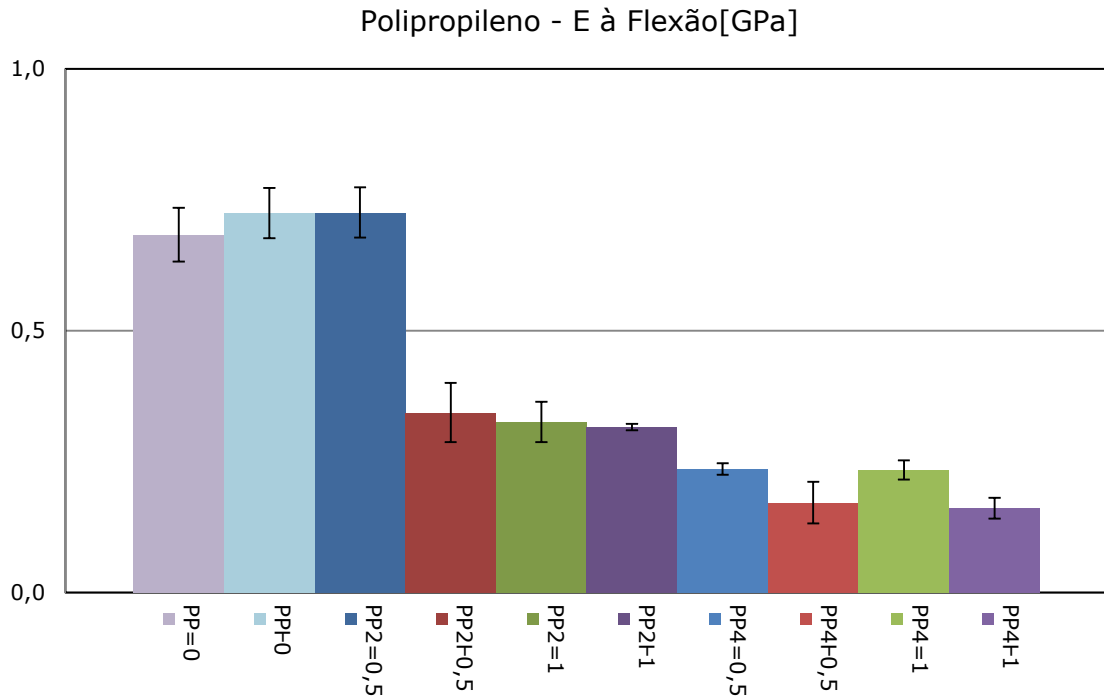


Figura 5-9: Resultados de módulo de elasticidade obtidos para provetes em PP processados com e sem gás.

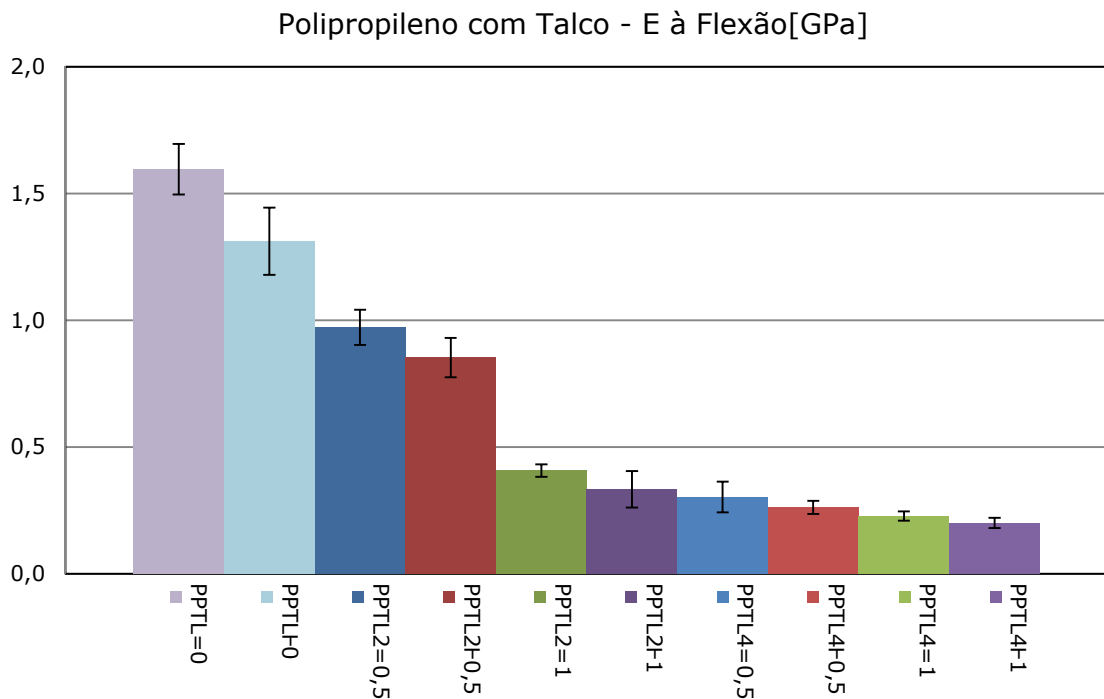


Figura 5-10: Resultados de módulo de elasticidade obtidos para provetes em PP com Talco processados com e sem gás.

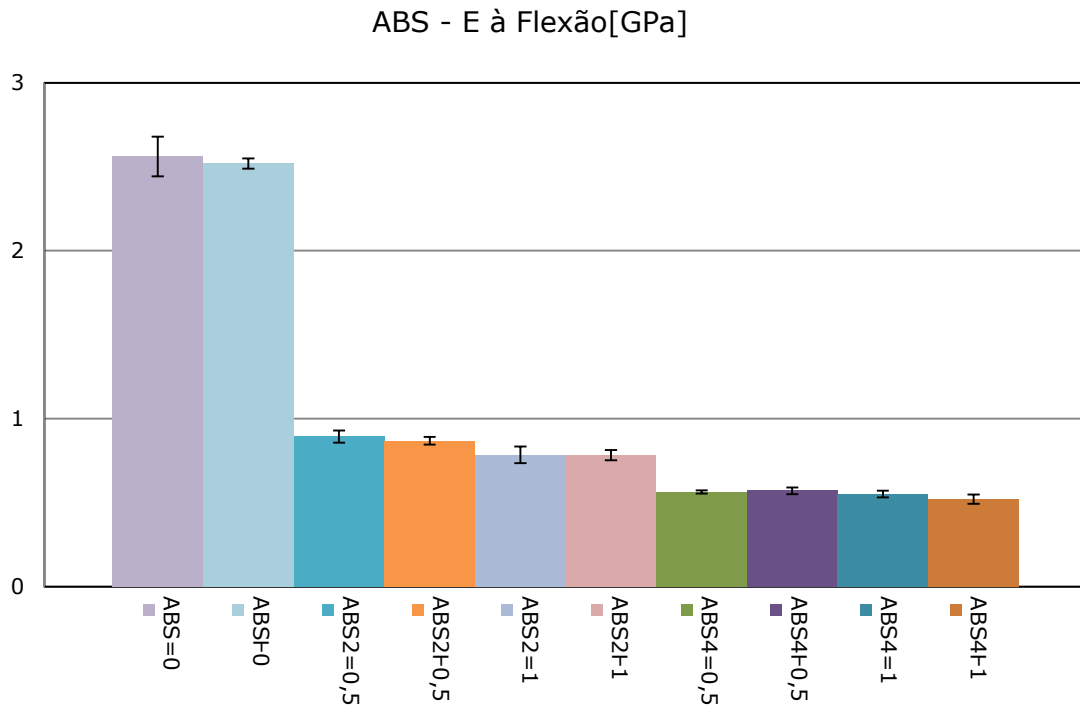


Figura 5-11: Resultados de módulo de elasticidade obtidos para provetes em ABS processados com e sem gás.

Na Figura 5-12 são apresentadas as curvas típicas de tensão em flexão em 3 pontos versus deslocamento para os diferentes materiais processados sem gás e com fluxo na direção paralela e transversal.

No processamento das placas sem gás não foi utilizada a 2ª pressão (ciclo de moldação convencional) o que tem, naturalmente influência nas propriedades do material processado. O ABS é o material que apresenta maiores valores de tensão máxima em flexão em 3 pontos, com um valor médio de 103 MPa, relativamente ao PP com talco, com um valor médio de 39,1 MPa, e ao PP, com um valor médio de 34,5MPa. Naturalmente, os materiais processados na direção longitudinal (=) admitem maiores valores de tensão máxima que os processados no sentido transversal (†). O ABS apresenta, também, valores de módulo (E) superiores, 1,7 GPa, seguindo-se o PPTL, com 1,14 GPa, e com o menor valor o PP, com 0,73 GPa.

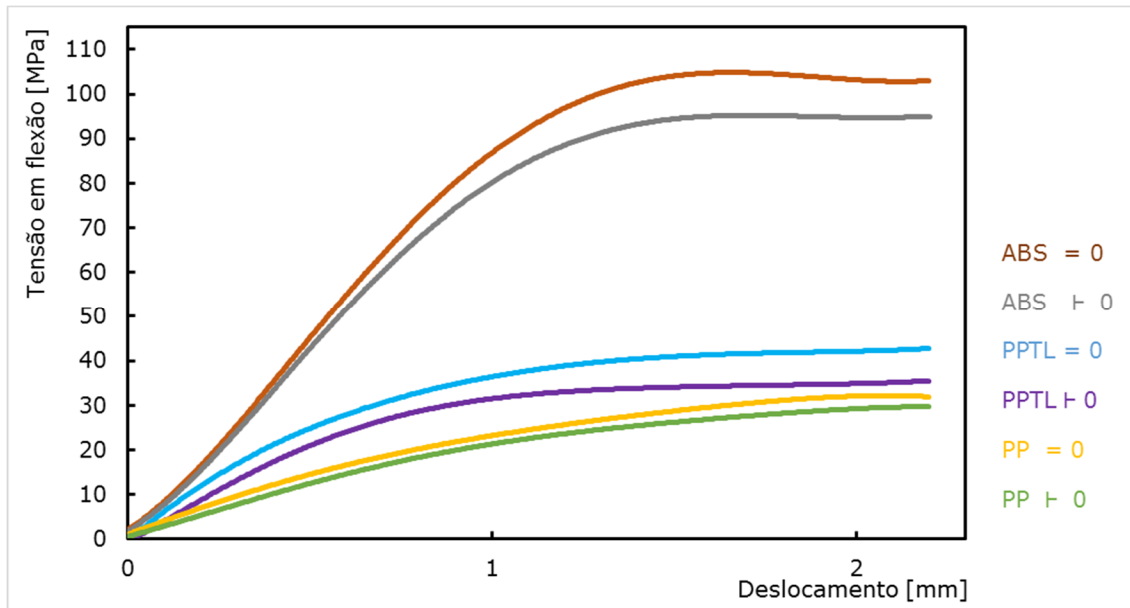


Figura 5-12: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais sem adição de gás.

Na Figura 5-13 são apresentadas as curvas típicas de tensão em flexão (em 3 pontos) versus deslocamento obtidas para os diferentes materiais de polipropileno processados com e sem gás e 2 mm de espessura. Pode-se observar que o polipropileno sem gás apresenta valores de tensão máxima e de módulo superiores aos materiais em polipropileno processados com gás, que vão perdendo resistência mecânica com o aumento do gás. É possível, também, observar que os valores de tensão máxima e de módulo do polipropileno com gás processados na direção longitudinal (=) apresentam valores superiores aos processados na direção transversal (⊥).

O PP com 1% de gás e fluxo transversal, apresenta menor resistência mecânica, com uma diminuição de 29,3% na resistência mecânica e 56,4% no módulo, relativamente ao polipropileno processado sem gás. Já o PP com 0,5% de gás e fluxo paralelo é o que garante melhores características de resistência mecânicas face ao polipropileno processado sem gás, com 14,3% na resistência mecânica e 0,1% no módulo de elasticidade.

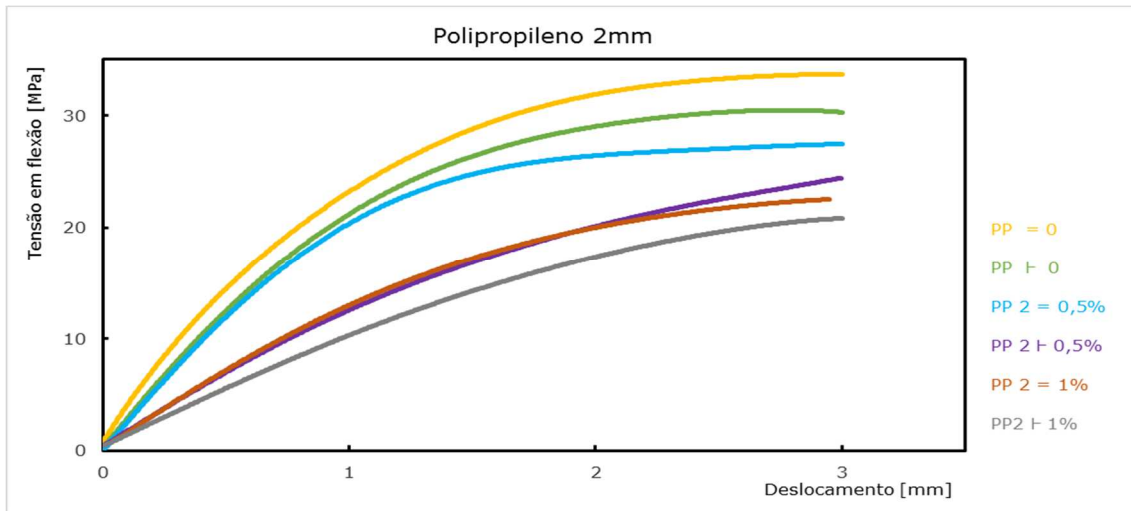


Figura 5-13: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de polipropileno processados com e sem gás (0, 0.5, 1) na direção transversal e longitudinal, com h=2mm.

No caso do polipropileno processados com e sem gás e com 4 mm de espessura (Figura 5-14), observa-se a mesma tendência que a observada nas placas de 2 mm de espessura. No entanto, a espessura pode ter uma influência indireta na resistência do material, pois quanto maior for a espessura do material, maior liberdade terá o gás para se expandir. Essa distribuição de bolhas torna, naturalmente, as peças no seu “núcleo” mais porosas e, conseqüentemente, apresentam uma menor resistência mecânica relativamente aos materiais com 2 mm de espessura. Quando se compara um material PP com 4 mm de espessura e um PP de 2 mm de espessura, de fluxo paralelo e 1% de gás, é notar uma diminuição da resistência mecânica de 32,4% e 28,7%, respectivamente, ou seja o aumento da espessura de 2 para 4 mm, apresenta uma diminuição da resistência mecânica de 3,7%.

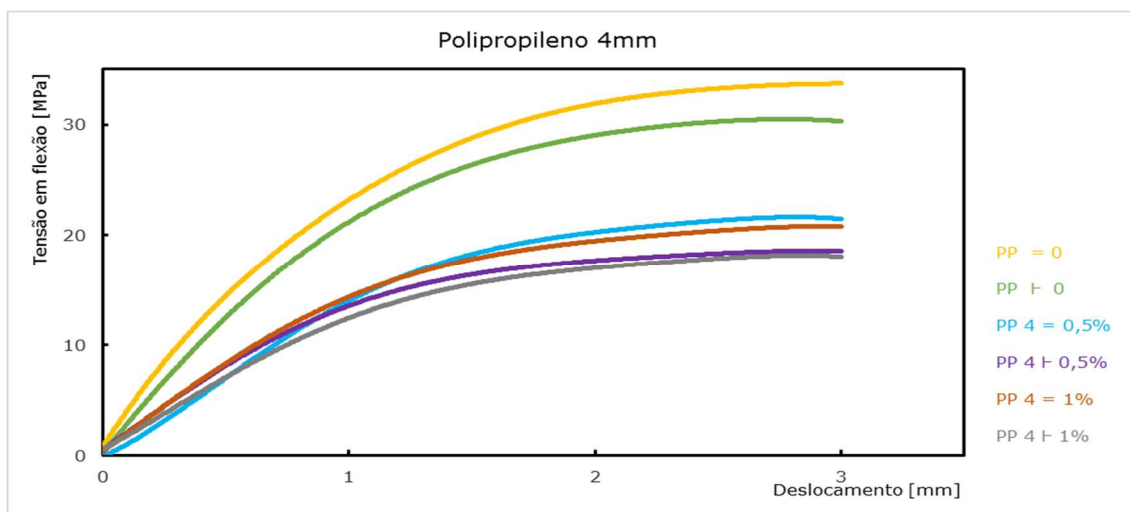


Figura 5-14: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de polipropileno processados com e sem gás (0, 0.5, 1) na direção transversal e longitudinal, com h=4mm.

Na Figura 5-15 são apresentadas as curvas típicas de tensão em flexão (em 3 pontos) versus deslocamento obtidas para os diferentes materiais de polipropileno com talco processados com e sem gás. Uma vez mais o polipropileno com talco e sem gás apresenta valores de tensão máxima e de módulo superiores aos materiais processados com gás. A partir da análise da figura, materiais ensaiados com 0,5% e o com 1% de gás, pode-se verificar que com o aumento da percentagem de gás, se observa uma ligeira diminuição das propriedades mecânicas (Tensão máxima e módulo), o que reforça a ideia de que quanto maior for a percentagem de gás nos materiais menor será a resistência mecânica dos materiais. É ainda possível observar que os valores de tensão máxima e de módulo do polipropileno, com gás processados na direção longitudinal (=), apresentam valores superiores de resistência mecânica que os processados na direção transversal (⊥).

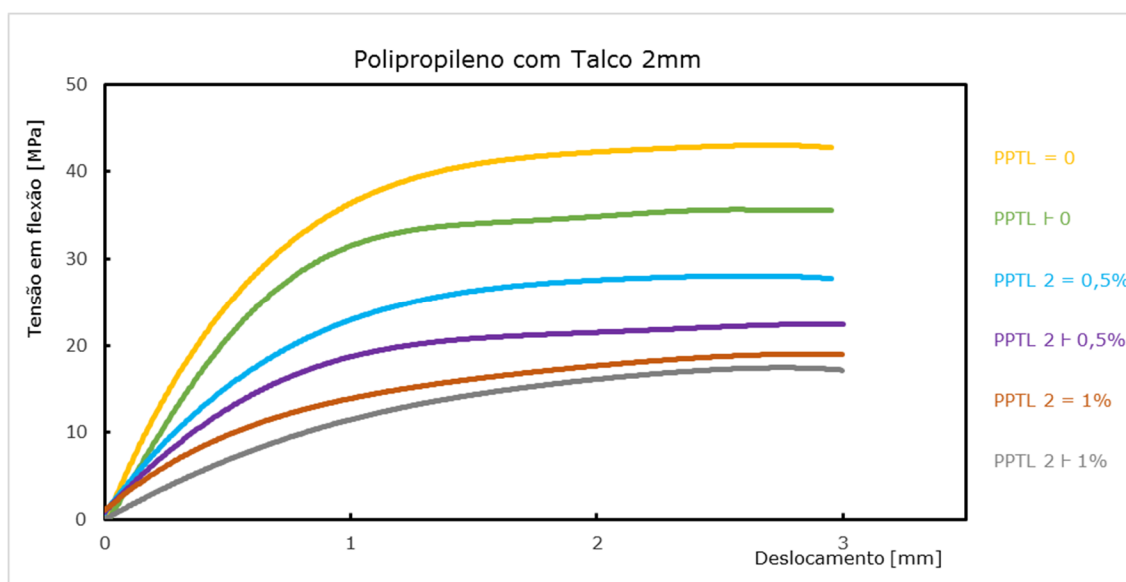


Figura 5-15: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de polipropileno com talco (PPTL) processados com e sem gás (0, 0.5, 1%) na direção transversal e longitudinal, com h=2mm.

Relativamente aos materiais de polipropileno com talco processados com e sem gás (0; 0,5% e 1), com 4 mm de espessura (Figura 5-16), a percentagem de gás, o sentido do fluxo, assim como o aumento da espessura, de 2mm para 4mm, influenciam, naturalmente, o comportamento mecânico dos materiais processados. Quanto maior for a percentagem de gás e maior a espessura, menor será o comportamento mecânico dos materiais processados.

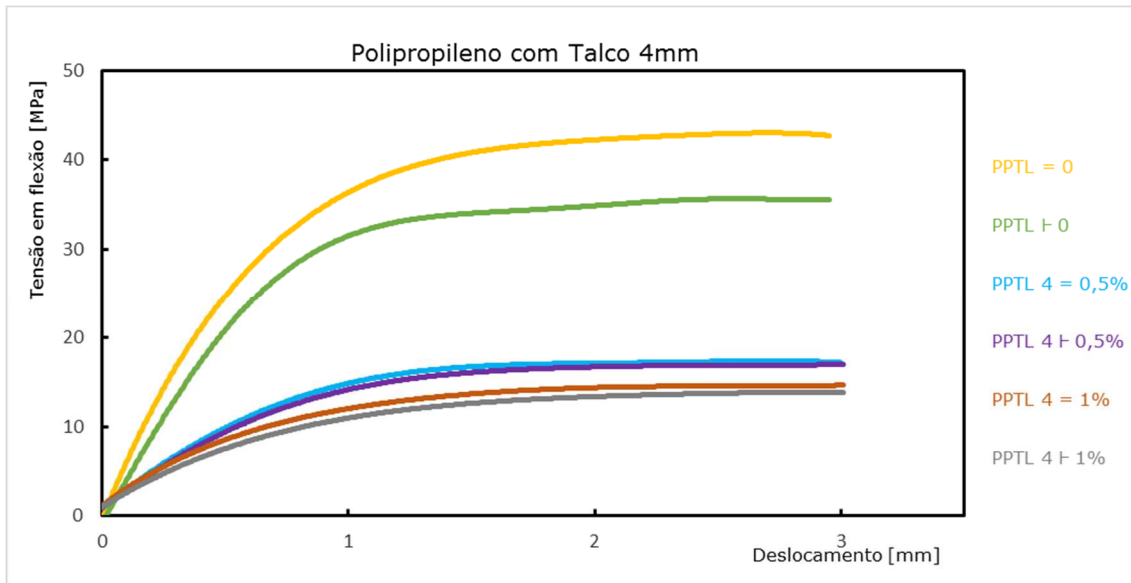


Figura 5-16: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de polipropileno com talco (PPTL) processados com e sem gás (0, 0.5, 1%) na direção transversal e longitudinal, com h=4mm.

O ABS, Acrilonitrila-Butadieno-Estireno exibe uma excelente combinação de propriedades mecânicas, bem como facilidade de processamento. Na Figura 5-17 são apresentadas curvas típicas de tensão versus deslocamento para matérias ensaiados com 2 mm de espessura, com e sem introdução de gás (0, 0,5% e 1%) e com fluxo paralelo e transversal. Também, neste caso, a injeção de gás na direção transversal se verifica uma diminuição da tensão máxima (41,2% a 46,7%) bem como do módulo de elasticidade.

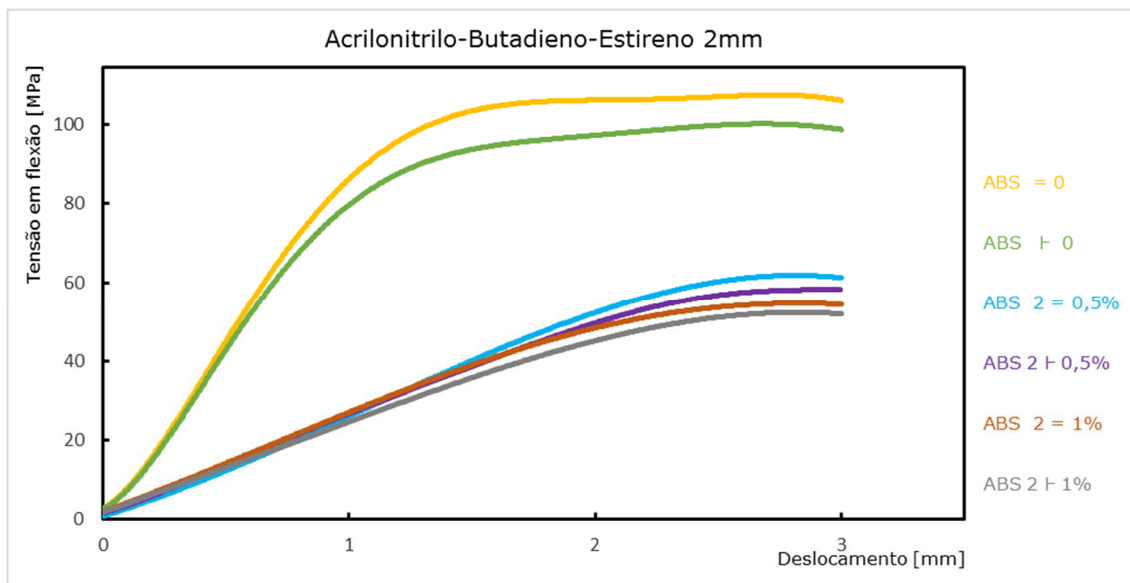


Figura 5-17: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno, ABS processados com e sem gás (0, 0.5, 1%) na direção transversal e longitudinal, com h=2mm.

Na Figura 5-18 são apresentadas curvas típicas de tensão versus deslocamento para o ABS mas com uma espessura de 4 mm. Uma vez mais se verifica que quanto maior a percentagem de gás e maior a espessura, menor será o a resistência mecânica dos materiais processados, observando-se uma diminuição de 58,6% relativamente ao material processado sem gás (ABS). É, também possível observar que os materiais com maior espessura (4 mm) apresentam uma diminuição mais acentuada da resistência (cerca de 14,3%) mais que os materiais processados com espessura (menor 2 mm).

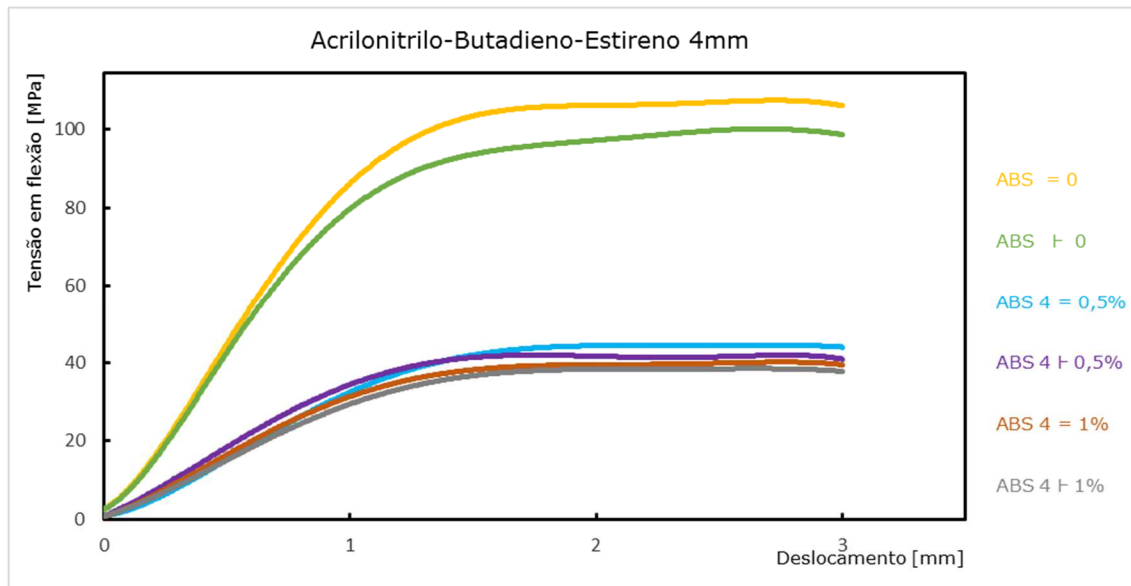


Figura 5-18: Curvas típicas de tensão versus deslocamento obtidas para os vários materiais de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno, ABS processados com e sem gás (0, 0,5, 1%) na direção transversal e longitudinal, com h=4mm.

5.4 Ensaio DMA

Na figura seguinte, Figura 5-19, pode-se avaliar a rigidez dos vários materiais processados (ABS, PP e PPTL; com e sem gás) com o aumento da temperatura (gama entre 20 e 100 °C). Com o aumento da percentagem de gás (e com o aumento da temperatura) pode-se observar uma diminuição da rigidez (*storage modulus*) na gama de temperaturas consideradas no ensaio de DMA em flexão em 3 pontos. A partir da análise das curvas de variação do módulo em flexão em três pontos (*storage modulus*) que os materiais poliméricos ABS processados com gás (0,6 e 1%) apresentam de rigidez maiores na gama de temperaturas entre os 78 e 90 °C. No caso dos materiais poliméricos PP e PPTL pode-se observar uma ligeira diminuição dos valores de rigidez nos materiais processados com gás, na gama de temperaturas de ensaio consideradas. Os materiais PP apresentam temperaturas de transição vítrea (T_g) inferiores à

temperatura ambiente o que explica o andamento das curvas de variação de rigidez obtidas. No caso do ABS processado sem gás, a T_g é de 80 °C, obtida a partir das curvas de Tan Delta dos ensaios de DMA.

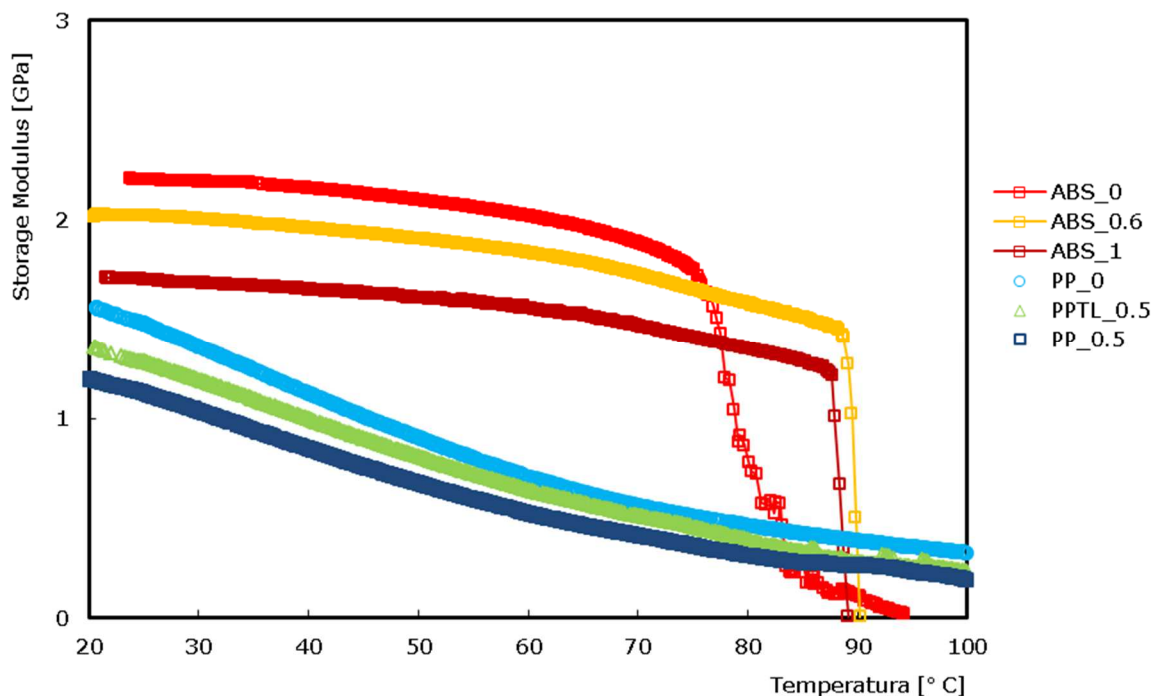


Figura 5-20: Curvas de variação *Storage modulus* versus temperaturas para os vários materiais processados (ABS, PP e PPTL), com e sem gás.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões gerais

As peças processadas por injeção com recurso à tecnologia *MuCell*® têm aplicação importante no fabrico de peças técnicas em material polimérico, especialmente na indústria automóvel. Esta tecnologia permite utilizar diferentes materiais plásticos, diminuição do ciclo de moldação, redução de empenos, e obter peças plásticas com geometrias relativamente complexas.

Com o objetivo otimizar e caracterizar os diferentes materiais processados (ABS, PP e PPTL) com diferentes percentagens de gás foi desenvolvido e fabricado um molde de injeção para ser utilizado numa máquina de injeção equipada com a tecnologia *MuCell*®.

Caraterização física

Foi possível observar nos materiais estudados (PP, PPTL e ABS) com injeção de gás (e com o aumento da sua percentagem) uma natural diminuição da densidade. As placas de PP com 4 mm de espessuras e com 1% de azoto apresentaram uma redução máxima de 16% no valor da densidade.

Foram analisadas as seções transversais das placas processadas com diferentes percentagens de azoto. Foi possível observar a existência de bolhas no núcleo das placas e que estas aumentavam, naturalmente, com da percentagem de gás e que são responsáveis pela diminuição das propriedades mecânicas

Caraterização mecânica (ensaios de flexão em 3 pontos e ensaios de DMA)

Foram determinados os valores tensão máxima e de módulo de elasticidade para os diferentes materiais processados. Estes apresentaram uma natural diminuição das propriedades mecânicas (tensão máxima e módulo de elasticidade em flexão em três pontos) com o aumento da percentagem de azoto.

A orientação do fluxo de injeção nas placas processadas, nas duas direções consideradas (transversal e longitudinal), tem naturalmente influência nas propriedades mecânicas dos diferentes materiais processados. Os resultados referentes às propriedades mecânicas dos materiais processados (com e sem gás), na direção transversal, são inferiores às dos materiais processados na direção longitudinal.

O aumento da espessura das diferentes placas processadas com gás (de 2 para 4 mm) apresentam menores propriedades mecânicas (tensão máxima e módulo de elasticidade) que as placas com 2 mm de espessura. O aumento da espessura vai permite uma maior expansão das bolhas de azoto e uma menor compressão das mesmas.

Foram, também, obtidas as curvas variação rigidez versus temperatura para vários materiais processados (ABS, PP e PPTL; com e sem gás) na gama de temperaturas entre os 20 e os 100 °C. Com o aumento da percentagem de gás (e com o aumento da temperatura) pode-se observar uma diminuição da rigidez (*storage modulus*) para todos os materiais processados com e sem gás. Os materiais poliméricos de ABS processados com gás (0.6 e 1%) apresentaram valores de rigidez maiores na gama de temperaturas entre os 78 e 90 °C que o ABS sem injeção de gás.

Os materiais poliméricos PP e PPTL apresentaram uma ligeira diminuição dos valores de rigidez nos materiais processados com gás, na gama de temperaturas de ensaio considerada. Os materiais PP apresentam temperaturas de transição vítrea (T_g) inferiores à temperatura ambiente o que explica o andamento das curvas de variação de rigidez obtidas. No caso do ABS processado sem gás, a T_g é de 80 °C, obtida a partir das curvas de Tan Delta dos ensaios de DMA. Os ensaios de DMA são importantes para analisar as temperaturas de serviço a utilizar com os componentes em material polimérico.

6.2 Trabalhos Futuros

Em termos de trabalhos futuros seria interessantes realizar:

- Análise reológica dos materiais processados com tecnologia *MuCell*;
- Avaliação da influência dos ataques (pontos de injeção) e posição dos canais de injeção utilizando as versões criadas no molde desta dissertação, no processamento das placas;
- Ensaio de impacto com as placas processadas com diferentes percentagens de gás e diferentes materiais;
- Avaliação do comportamento mecânico dos materiais processados quando sujeitos a diferentes dias de imersão em água;
- Aplicação do processo *MuCell*® a um caso prático da indústria automóvel (realização do molde, injeção da peça e avaliação da peça);

Capítulo 7

Bibliografia

- [1] TREXEL INC, MuCell® Processes, “Formación del Proceso MuCell® de Trexel”.
- [2] A. M. Cunha, A. M. Brito, A. Matos e A. J. Pontes, Manual do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico - Moldação por Injecção e Materiais Plásticos, Marinha Grande: Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos, 2003.
- [3] A. Matos, A. S. Pouzada, E. C. Ferreira, R. Soares, H. Campante, A. J. Pontes e A. M. Brito, Manual do Projectista (Para Moldes de injecção de plásticos), Marinha Grande: CENTIMF.
- [4] A. Cunha, A. J. Pontes e A. M. Brito, Manual do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico: Moldação por Injecção e Materiais Plásticos, Marinha Grande: Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos, 2003.
- [5] L. Sors, L. Bardócz e I. Radnóti, Plásticos Moldes e Matrizes, Curitiba: Hemus, 2002.
- [6] J. Harada, Moldes para Injeção de Termoplásticos, São Paulo: ArtLiber, 2004.

- [7] J. Xu e D. Pierick, "Microcellular Foam Processing In Reciprocating - Srew Injection Molding Machines," *Journal of Injection Molding Technology(USA)*, 2001.
- [8] Martini-Vvedensky, J. E., N. P. Suh e F. A. Waldman, "Massachusetts Institute of Technology". USA/Cambridge, MA Patente 4,473,665, 30 Julho 1984.
- [9] Plastics Additives & Compounding, "Ticona establishes laboratory MuCell Microcellular Moulding Technology," *Plastics Additives & Compounding*, p. 5, 2001.
- [10] H. Wu, E. Wintermantel e H. J. Haugen, "The effects of Mold Design on the Pore Morphology of Polymers Produced with MuCell® Technology," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 46, nº MuCell® Technology, pp. 519-529, 2010.
- [11] TREXEL INC, MuCell® Processes, Los componentes MuCell® del sistema SCF, Serie II.
- [12] H. K. E. S. H. a. W. E. Wu, Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [13] C. Park e N. Suh, "Cellular Polymers," *ASME*, vol. 38, pp. 69-91, 1992.
- [14] N. Suh, "Chapter 3," em *Innovation in Polymer Processing*, J. F. Stevenson, Ed., Hanser/Gardner Publications, Inc., 1996.
- [15] C. Wang, K. Cox e G. Campbell, "Microcellular Foam of Polypropylene Containing Low Glass Transition Rubber Particles in an Injection Molding Process," *ANTEC*, pp. 406-410, 1995.
- [16] K. N. T. H. K. I. T. S. a. T. T. M. Shimbo, "Foam Processing Technology of Microcellular Plastics by Injection Mold Machine," *First Int. Conf. Thermoplast. Foam*, pp. 132-137, 1999.
- [17] M. Shimbo, "Foam Injection Technology and Influence Factors of Microcellular Plastics," *FOAMS 2000*, pp. 162-168, 2000.
- [18] Trexel, Inc, "MuCell® - Microcellular Foaming Technology for Plastics Processing Industry," p. 8, 09 Agosto 2011.

- [19] Trexel INC., "MuCell Microcellular Foaming Solutions for Engineered Plastic Parts Improved Quality & Lower Costs," 2013. [Online]. Available: <http://www.trexel.com/>. [Acedido em Abril - Julho 2014].
- [20] M. C. R. R. Sampaio, "INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO NA ESTRUTURA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ESPUMAS ESTRUTURAIS INJECTADAS COM AGENTES EXPANSORES QUÍMICOS," Universidade do Minho, Minho, 2004.
- [21] D. Klemperer e F. K.C., Handbook of polymeric foams and foam technology, New York: Hanser Publishers, 1991.
- [22] B. D. a. S. N. Park C.B., "Effects of the Pressure Drop Rate on Cell Nucleation in Continuous Processing of Microcellular Polymers," *Polymer Engineering and Science*, 1995.
- [23] L. H. L. G. L. X. a. H. J. Sun X., "Investigation on the Cell Nucleation and Cell Growth in Microcellular Foaming by Means of Temperature Quenching," *Willey InterScience*, 2004.
- [24] Z. Zhang, "A study of ultra-high-molecular-weight polyethylene - Dissertação de Mestrado," Universidade Laval, Quebec, 2001.
- [25] M. G. d. Almeida, "Incorporação de Polietileno Pós-Consumo em Espumas de Polietileno de Baixa Densidade - Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa," Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.
- [26] K. Simpson, "Plastics Additives & Compounding," *Blowing Agents Update.*, pp. 28-30, Novembro/Dezembro 2003.
- [27] M. Rabello, Aditivação de polímeros, São Paulo: Artliber Publishers, 2000.
- [28] W. K. e D. Padsalgikar, "Modelo possibilita prever o desempenho da injeção de termoplásticos expandidos," *Plástico Industrial*, pp. 180-185, 2004.
- [29] W. D. Vilar, Química e Tecnologia dos Poliuretanos, Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 1999.
- [30] A. A. N. Pasquini, Polypropylene Handbook, Munique: Hanser Verlag, 2005.
- [31] C. P. M. K. S. Doroudiani, *Polymer Engineering and Science* 36, vol. 2645, 1996.

- [32] C. P. M. K. S. Doroudiani, *Polymer Engineering and Science* 38, vol. 1205, 1998.
- [33] P. N. P. M. T. K. N. H. A. U. M. Okamoto, "Nano Letters 1," vol. 295, 2001.
- [34] P. P. H. Shyh-shin Hwang, "Effects of silica particle size on the structure and properties of polypropylene/ silica composites foams," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, p. 1377–1383, 2013.
- [35] Busico e CIPULLO, "New evidence on the nature of active sites in heterogeneous Ziegler-natta catalysts for propene polymerization," em *Macromolecules*, 1997, pp. 4786-4790.
- [36] Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, "MATERIAIS POLIMÉRICOS," ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2005.
- [37] E. B. MANO, *Introdução a Polímeros*, São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1985.
- [38] E. C. L. Cardoso, "Desenvolvimento de Espumas a partir de Misturas Poliméricas de Polipropileno Linear (PP) e Polipropileno de Alta Resistência do Fundido," ipen da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [39] W. e. a. MICHAELI, *Tecnologia dos Plásticos*, São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1995.
- [40] R. N. SHREVE e J. A. BRINK JR, *Indústrias de processos químicos*, Rio de Janeiro: Guanabara Dois S/A, 1980.
- [41] L. B. CARVALHO, "Produção de polipropileno bi-orientado (BOPP): tecnologia e aplicações.," Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química, Bragança, 2007.
- [42] M. Caetano, "CTB - Plásticos," 19 02 2011. [Online]. Available: http://www.ctb.com.pt/?page_id=877. [Acedido em 2015 02 19].
- [43] R. R. CIMINELLI, "Caracterização das propriedades físicas, químicas e estruturais do talco em compostos termoplásticos," Congresso Brasileiro do Plástico Reforçado, São Paulo, 1986.

- [44] F. L. PRISCILA, "Polipropileno com talco: um estudo comparativo do PP com talco x PP com óxido de cálcio para melhoria de seu aspecto visual em peças automobilística," FACULDADE DE TECNOLOGIA DA ZONA LESTE, São Paulo, 2011.
- [45] J. A. M. Agnelli, "GLOSSÁRIO DE TERMOS APLICADOS A POLÍMEROS - Boletim Técnico," Braskem, 2002.
- [46] J. Fred W. Billmeyer, *Ciencia de los Polimeros*, Barcelona: © Editorial Reverté, S. A., 1975 , 2004.
- [47] AIR LIQUIDE 2013, "Gas Encyclopedia," AIR LIQUIDE, 2013. [Online]. Available: <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=5>. [Acedido em 23 Abril 2014].
- [48] S. C. R. Furtado, "Cálculo Estrutural Numérico e Experimental da Carenagem de um Veículo - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica," IST, Lisboa - Portugal, 2009.
- [49] American Society for Testing and Materials, "Standard Test for Tensile Properties of Plastic," em *Annual Book of ASTM*, 1980, p. Part 35.
- [50] S. R. S. K. R. G. Sankaram, "Characterization of epoxy syntactic foams by dynamic mechanical analysis," em *Journal Materials Science*, 2006, pp. 4485-4491.
- [51] S. R. S. K. R. G. M. N. J. K. Sankaram, "Characterization of epoxy syntactic foams by dynamic mechanical analysis," *Journal Materials Science*, vol. 36, pp. 4485-4491, 2006.
- [52] K. D. a. F. K.C., *Handbook of Polymeric Foams and Foam*, Hanser, 1991.