



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise do desempenho mecânico de componentes obtidos pela tecnologia MuCell

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

João Pedro Teixeira Lima

Orientadores

José António Martins Ferreira

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Costa Professor da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela Professor do Instituto Politécnico de Leiria
Orientador	Professor Doutor José António Martins Ferreira Professor da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



GECO



**Instituto Politécnico
de Leiria**

Coimbra, Julho, 2014

“Procurar sempre antecipar o futuro e procurar sempre mais e melhor conduz a um estado de espírito em que nada é impossível.”

Henry Ford, 1922

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

- Aos meus pais, pelo amor incondicional e por nunca deixarem de acreditar nas minhas capacidades
- Ao meu irmão, pelo seu exemplo de sucesso e inteligência, por todos os momentos em que esteve ao meu lado, e pelos autocolantes quadrados
- Ao Professor Doutor José António Martins Ferreira e ao Professor Doutor Carlos Capela, pela orientação, pelo conhecimento científico, amizade e disponibilidade
- Ao Professor Doutor José Domingos pela ajuda na realização dos ensaios de tração
- Ao Eng. Joel da Silva e ao Sr. Fernando pelo *know how* e a sua disponibilidade na realização das mais diversas tarefas
- A todos os meus amigos e restantes familiares que me permitiram chegar a esta fase da vida e me deram coragem e conhecimento no decorrer da minha vida social e académica.

Resumo

MuCell é uma tecnologia de redução da densidade de polímeros baseada na formação de pequenas células gasosas usando principalmente azoto ou o dióxido de carbono. Este processo é desenvolvido durante a fase de injeção do polímero. As reduções de peso típicas são de 8% a 12%, mas a redução de peso global pode atingir os 25% combinando de redução da densidade e mudanças de design. As melhorias de qualidade são normalmente maiores do que 50-75%, se forem considerados parâmetros como o nivelamento e o empenamento.

O processo MuCell é uma tecnologia de processamento de moldagem por injeção permitindo obter: componentes mais leves, reduzir os custos de produção devido ao menor uso de material, tempos de processo mais curtos, componentes dimensionalmente mais uniformes, empenamento reduzido. Atualmente este processo já é utilizado no fabrico de inúmeros componentes na indústria automóvel.

Apesar da resistência à tração dos materiais diminuir com o aumento de gás utilizado no processo de fabrico, a capacidade de absorção de energia aumenta. Esta tecnologia permite ainda aumentar a temperatura de transição vítrea do ABS em 10°C.

Palavras-chave: MuCell, Moldagem por injeção, Redução de peso, Polímeros, Resistência à tração, Energia absorvida

Abstract

MuCell is a technology for reducing density of polymers based on the formation of small gas cells using principally nitrogen or carbon dioxide. This process is developed during the injection phase of the polymer. The typical weight reductions are 8% to 12%, but the overall weight reduction can reach 25% considering jointly reducing the density and design changes.

The MuCell providing: lighter components, reducing production costs due to reduced material usage, shorter process times, more dimensionally uniform components, reduced warpage. Currently this process is already used in the manufacture of numerous components in the automotive industry.

Although the tensile strength of the materials decreases with the increase of the amount of gas used in the manufacturing process, the energy absorption capacity increases. This technology also allows to increase the glass transition temperature of ABS by 10 ° C.

Keywords MuCell, Injection Molding, Weight Reduction, Polymers, Tensile strength, Absorbed energy

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Plano de dissertação	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Introdução	3
2.2. Materiais	3
2.2.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno - ABS	3
2.2.2. Polipropileno - PP.....	4
2.2.3. Propriedades	6
2.3. Efeito dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de componentes obtidos com MuCell	6
2.4. Processamento	7
2.4.1. Moldagem por injeção	7
2.4.2. Tecnologia MuCell.....	8
3. Procedimentos Experimentais	13
3.1. Ensaio de tração	13
3.1.1. Equipamento e condições	13
3.1.2. Provetes	15
3.2. Ensaio de impacto	15
3.2.1. Equipamento e condições	15
3.2.2. Provetes	17
3.2.3. Áreas de dano	17
3.2.4. Resistência residual	18
3.3. Densidade.....	20
3.4. DMA	21
4. Apresentação de Resultados	23
4.1. Ensaio de tração	23
4.2. Ensaio de impacto	29
4.2.1. Força máxima	29
4.2.2. Energia absorvida	31
4.2.3. Áreas de dano	33
4.2.4. Resistência residual	34
4.3. Densidade.....	35
4.4. DMA	36

5. Conclusões e Trabalhos Futuros	39
5.1. Conclusões.....	39
5.2. Trabalhos futuros	39
Referências Bibliográficas	41
ANEXO A.....	43
ANEXO B	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Unidades químicas estruturais do ABS.....	3
Figura 2.2. Unidade química estrutural do PP.....	5
Figura 2.3. Secção de uma máquina de moldagem de plásticos por injeção com parafuso alternativo.....	7
Figura 2.4. Morfologia de uma espuma de PP T20 obtida com a tecnologia MuCell.....	9
Figura 2.5. Tempos de ciclo com e sem a tecnologia MuCell.....	9
Figura 2.6. Processo de difusão do gás no polímero.....	10
Figura 2.7. Máquina de injeção de materiais plásticos com tecnologia MuCell.....	10
Figura 2.8. Molde utilizado no fabrico de placas com 100 x 100 x 4 mm de tamanho.....	11
Figura 2.9. Injetora localizada nas instalações da empresa GECO.....	11
Figura 3.1. Máquina de ensaios Shimadzu AG-10 e extensómetro.....	14
Figura 3.2. Geometria e dimensões de um provete de ensaio de tração.....	15
Figura 3.3. Máquina de ensaios Instron Ceast 9340.....	16
Figura 3.4. Sistema de ajuste de altura e apoio livre do provete.....	16
Figura 3.5. Fotografia em contraluz de um provete de PP sujeito a um impacto de 4J.....	17
Figura 3.6. Fotografia em contraluz de um provete de ABS com 1% de N ₂ sujeito a um impacto de 4J.....	18
Figura 3.7. Máquina de ensaios Instron 4206.....	19
Figura 3.8. Maquinação dos provetes para ensaio de resistência residual.....	19
Figura 3.9. Balança de precisão AND GH-202.....	20
Figura 3.10. Modos de operação num ensaio DMA a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração; e) flexão em 3 pontos.....	21
Figura 3.11. Equipamento de ensaio de DMA utilizado nos ensaios.....	21
Figura 4.1. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de ABS.....	23
Figura 4.2. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de PP.....	24
Figura 4.3. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de PP T20.....	24
Figura 4.4. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de ABS.....	24
Figura 4.5. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de PP.....	25
Figura 4.6. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de PP T20.....	25
Figura 4.7. Provetes de ABS com 0,6% de N ₂ . Esquerda: 4mm; Direita: 2mm.....	26

Figura 4.8. Provetes de PP T20 Esquerda: 4mm 0,5%; Direita: 2mm 1%.....	27
Figura 4.9. Vista de fratura de um componente fabricado em PP T20	27
Figura 4.10. Tensão máxima em função da percentagem de azoto dissolvido	28
Figura 4.11. Curvas típicas de carga versus deslocamento num ensaio de impacto	30
Figura 4.12. Força máxima em função da % de N ₂ para ensaios de 2J.....	30
Figura 4.13. Força máxima em função da % de N ₂ para ensaios de 4J.....	31
Figura 4.14. Energia em função do tempo	32
Figura 4.15. Energia absorvida em função da % de N ₂ para ensaios de 2J.....	32
Figura 4.16. Energia absorvida em função da % de N ₂ para ensaios de 4J.....	32
Figura 4.17. Áreas de dano da % de N ₂ para ensaios de 2J	33
Figura 4.18. Áreas de dano da % de N ₂ para ensaios de 4J	34
Figura 4.19. Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da temperatura.....	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais em estudo	6
Tabela 3.1. Materiais e parâmetros em estudo	13
Tabela 4.1. Tensão máxima e módulo de elasticidade dos materiais estudados	28
Tabela 4.2. Altura e velocidade de queda em função da energia de impacto	29
Tabela 4.3. Resistência residual dos materiais estudados	35
Tabela 4.4. Densidade e propriedades específicas dos materiais em estudo	36
Tabela 4.5. Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da temperatura.....	38

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

% wt	percentagem de peso
A	área/secção
bar	bar (unidade de pressão ≈ 1 atmosfera)
cm	centímetro
CO ₂	dióxido de carbono
F	força
g	aceleração da gravidade
h	altura
J	Joule
L ₀	comprimento inicial
m	metro; massa
min	minuto
mm	milímetro
N	Newton
N ₂	azoto
°C	grau Celcius
Pa	Pascal
s	segundo
ton	tonelada
ΔL	variação de comprimento
ε	deformação
σ	tensão
<i>E</i>	módulo de elasticidade; energia

Siglas

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Computer Numerical Control
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PP T20	Polipropileno com 20% de peso em talco
PP	Polipropileno
SCF	<i>Supercritical Fluid</i> (Fluído Supercrítico)
UC	Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os polímeros são dos materiais mais utilizados a nível mundial em diversas aplicações, como por exemplo no fabrico de componentes para automóveis, embalagens, brinquedos, material de escritório, entre muitos outros. No entanto, o frequente aumento do preço do petróleo leva também ao aumento do preço destas matérias-primas.

As espumas de polímeros são materiais que têm vindo a despertar cada vez mais interesse pois permitem poupar matéria-prima produzindo componentes mais leves e com ótima estabilidade dimensional. Sendo menos densas, as peças tornam-se também mais baratas e quando aplicadas em meios de transporte permitem um aumento da eficiência energética uma vez que baixam o peso final dos mesmos.

MuCell é o nome de um processo de produção contínua destas espumas que foi desenvolvido pelo MIT no início dos anos 80 [1]. É um processo de redução de densidade de polímeros, que decorre durante a fase de injeção, e é baseado na formação de células gasosas micrométricas.

Este estudo pretende avaliar o efeito deste processo no desempenho mecânico (nas propriedades mecânicas e nos seus valores específicos) de componentes de polímeros, nomeadamente a resistência e rigidez à tração, a resistência ao impacto e a variação da rigidez em função da temperatura. Os materiais em foco são o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), o Polipropileno (PP) e o Polipropileno com 20% de talco (PP T20).

1.2. Plano de dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos: Introdução; Revisão Bibliográfica; Procedimentos Experimentais; Apresentação e Discussão de Resultados; Conclusões e Trabalhos Futuros.

No capítulo 2 é feita uma breve revisão bibliográfica na qual são apresentados os materiais em estudo e as suas propriedades. É também explorada uma técnica de

processamento deste tipo matéria-prima: a injeção. É ainda feita uma análise aos equipamentos e geometria dos provetes utilizados nos vários ensaios.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos para os vários ensaios.

A apresentação e discussão dos resultados é feita no capítulo 4.

O capítulo final apresenta as conclusões deste estudo bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Um polímero pode ser considerado como um material constituído por macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores (os monómeros). Dentro do grupo dos polímeros existem os plásticos e os elastómeros. Os plásticos constituem um grupo muito vasto e variado de matérias sintéticas, que são processados por enformação ou moldagem, de modo a adquirirem uma forma. Dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, os plásticos podem ser divididos em duas classes: os termoplásticos e os termoendurecíveis.

Os termoplásticos necessitam de calor para serem enformados e, após o arrefecimento, mantêm a forma que adquiriram durante a enformação. Estes materiais podem várias vezes ser reciclados e tomar novas formas sem que ocorra uma alteração significativa das suas propriedades [2].

2.2. Materiais

2.2.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno - ABS

ABS é o nome dado a uma família de termoplásticos. O acrónimo deriva dos três monómeros utilizados na sua produção: acrilonitrilo, butadieno e estireno (*styrene* em inglês), representados na Figura 2.1. Os materiais do tipo ABS são conhecidos pelas suas propriedades de engenharia, tais como boa resistência mecânica e ao impacto, combinadas com facilidade de processamento.

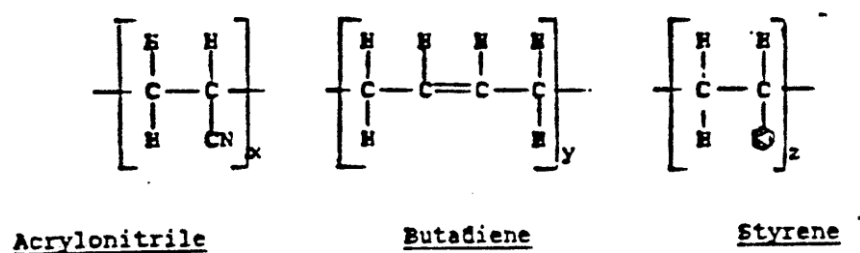


Figura 2.1. Unidades químicas estruturais do ABS

A vasta gama de propriedades importantes em engenharia exibida pelo ABS deve-se às propriedades com que cada um dos componentes contribui. O acrilonitrilo contribui com a resistência química e ao calor e a tenacidade; o butadieno melhora a resistência ao impacto e a retenção das propriedades de baixa temperatura; e o estireno contribui com o brilho superficial, a rigidez e a facilidade de processamento. A resistência ao impacto do ABS aumenta à medida que aumenta o teor de borracha, mas as propriedades tais como a resistência à tração e à temperatura de deflexão diminuem.

O ABS pode ser considerado uma mistura de um copolímero vítreo (estireno-acrilonitrilo) com domínios do tipo borracha (essencialmente um polímero ou copolímero de butadieno). A simples mistura da borracha com o copolímero vítreo não conduz a propriedades ótimas de resistência ao impacto. A melhor resistência ao impacto é obtida quando a matriz do copolímero de estireno-acrilonitrilo é enxertada nos domínios da borracha, produzindo uma estrutura bifásica.

As principais aplicações do ABS são tubagens e acessórios, em particular tubos de esgoto para edifícios. O ABS também é utilizado no fabrico de peças para automóveis, componentes de eletrodomésticos, tais como revestimentos de portas e interiores de frigoríficos, máquinas de escritório, caixas e revestimentos [2].

2.2.2. Polipropileno - PP

O polipropileno é o terceiro plástico mais importante do ponto de vista de volume de vendas nos Estados Unidos da América e é um dos mais baratos, uma vez que pode ser sintetizado a partir de matérias-primas petroquímicas baratas.

Ao passar de polietileno para o polipropileno, a substituição de cada um de dois átomos de carbono da cadeia polimérica principal por um grupo metilo, restringe a rotação das cadeias, originando um material mecanicamente mais resistente, mas menos flexível. Os grupos metilo das cadeias também provocam um aumento da temperatura de transição vítrea, pelo que o polipropileno tem uma temperatura de amolecimento e uma temperatura de deflexão superiores às do polietileno. A unidade química estrutural de repetição deste material está representada na Figura 2.2.

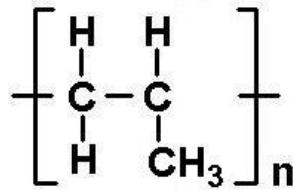


Figura 2.2. Unidade química estrutural do PP

O polipropileno possui um conjunto de propriedades atrativas para a produção de muitos produtos manufacturados. Nestas propriedades, incluem-se as boas resistências química, à humidade e ao calor, bem como a baixa densidade, boa dureza superficial e estabilidade dimensional. O polipropileno também tem uma boa resistência à flexão e pode ser utilizado em produtos com rótulas.

As suas principais aplicações são utensílios domésticos, componentes de eletrodomésticos, embalagens, utensílios de laboratório e garrafas de vários tipos. Na área dos transportes, os copolímeros de polipropileno com elevada resistência ao impacto substituíram a borracha rígida nas caixas das bateias. Usam-se resinas semelhantes em revestimentos de para-choques e coberturas de protecção. O PP com materiais de enchimento aplica-se no revestimento de ventiladores de automóveis e tubagens de aquecimento, em que é necessária uma elevada resistência à deflexão pelo calor. O homopolímero de polipropileno é ainda utilizado extensivamente na parte inferior de carpetes e, sob a forma de tecido, no fabrico de sacos de transporte de muitos produtos industriais. Sob a forma de filme, o PP é utilizado em sacos e em embalagens de produtos frágeis, devido ao seu brilho, polimento e boa rigidez. É ainda utilizado em parafusos de aperto, caixas e recipientes [2].

2.2.2.1. Polipropileno com 20% de talco - PP T20

A adição de talco ao polipropileno (PP T20 – para uma percentagem em peso de 20 %) é particularmente eficiente no aumento da rigidez e da temperatura de transição vítrea ou da resistência à deformação. O reforço planar ou lamelar das partículas de talco evita que a resistência à tração seja sacrificada, como acontece com as demais cargas minerais não fibrosas. O talco melhora ainda a resistência do material à corrosão, a dureza e a estabilidade dimensional, proporciona isolamento eléctrico, aumenta a aderência a superfícies metálicas e ajuda a reduzir o coeficiente de expansão térmica [3].

2.2.3. Propriedades

A Tabela 2.1 indica algumas propriedades dos materiais em estudo, tais como: densidade, resistência à tração, resistência ao impacto e temperatura máxima de utilização. Uma das principais vantagens dos materiais plásticos usados em engenharia é a sua baixa densidade (aproximadamente 1) quando comparada com a do aço (7,8). A resistência à tração é relativamente baixa, sendo, na maior parte dos plásticos, inferior a 70 MPa [2] [4].

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais em estudo

Material	Densidade [g/cm ³]	Resistência à tração [MPa]	Resistência ao impacto [J/m]	Temp. máx de utilização (sem carga) [°C]
ABS	1,05 - 1,07	41	320	70 - 95
PP	0,90 - 0,91	33 - 38	20 - 120	105 - 150
PP T20	1,04	32	30	100

2.3. Efeito dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de componentes obtidos com MuCell

São vários os parâmetros que podem influenciar quer a morfologia quer as propriedades mecânicas dos componentes produzidos com o recurso à tecnologia MuCell, tais como: a velocidade de injeção, o *shot size*, a quantidade (em percentagem de peso) e a pressão do gás, a temperatura do molde e ainda a temperatura do material injetado.

O aumento do *shot size* e da velocidade de injeção fazem aumentar a resistência à tração, à flexão e ao impacto dos componentes. O aumento da temperatura do molde até aos 155°C (±) também tem esse efeito. No entanto, a partir desta temperatura e até aos 180°C as resistências referidas diminuem. Estas resistências são ainda inversamente proporcionais à quantidade de gás injetado [5].

A nível morfológico, o aumento da pressão do gás de (entre 15 e 30 MPa) dá origem a um maior número de células e consequentemente a células mais pequenas. Já o aumento de temperatura (entre os 80 e os 90°C) tem o efeito contrário, isto é, aumenta ligeiramente o tamanho das células [6].

Com a tecnologia MuCell, quando aplicada ao fabrico de componentes em Policarbonato (PC), ainda possível aumentar a capacidade de absorção de energia de um componente em quase 25% (à temperatura ambiente) tendo ainda uma redução de peso de mais de 12% [7].

2.4. Processamento

São utilizados diversos processos para transformar os granulados e *pellets* de plástico em produtos de várias formas, tais como folha fina, varão, secções extrudidas, tubo ou peças acabadas. O processo utilizado depende, em certa medida, do tipo de plástico: se é um termoplástico ou um termoendurecível. Os termoplásticos são normalmente aquecidos até amolecerem e, em seguida, moldados antes de arrefecerem [2].

2.4.1. Moldagem por injeção

O processamento por injeção é um dos métodos de processamento mais importantes usados para dar forma aos materiais termoplásticos. Os equipamentos mais recentes de moldagem por injeção utilizam um mecanismo de parafuso alternativo para fundir o plástico e injetá-lo num molde - Figura 2.3. Os equipamentos de moldagem por injeção mais antigos utilizam um êmbolo para injetar o plástico “fundido”. Uma das principais vantagens do método do parafuso alternativo, em relação ao de êmbolo, é o facto de se obter uma solução mais homogénea.

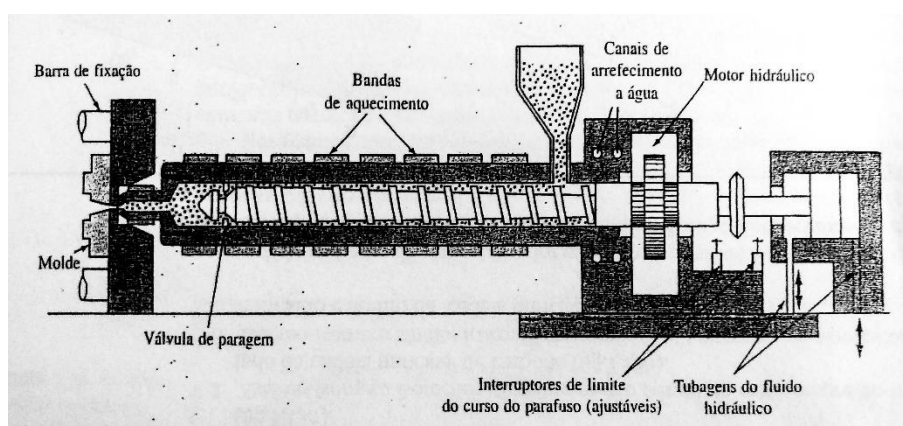


Figura 2.3. Secção de uma máquina de moldagem de plásticos por injeção com parafuso alternativo

No processo de moldagem por injeção, os granulados do plástico contidos numa tremonha alimentam, através de uma abertura no cilindro de injeção, a superfície de um parafuso em rotação que os empurra em direção ao molde. A rotação do parafuso faz com

que os granulados entrem em contacto com as paredes aquecidas do cilindro, provocando o seu amolecimento devido ao calor de compressão, do atrito e das paredes quentes do cilindro. Quando na extremidade do parafuso se atinge uma quantidade suficiente de material o parafuso para e, como um movimento linear, empurra o plástico, através de um sistema de gitagem, para as cavidades do molde fechado. O parafuso mantém a pressão aplicada ao material plástico introduzido no molde, durante um curto intervalo de tempo, permitindo que este arrefeça e solidifique, sendo depois recolhido. O molde é arrefecido com água, de modo a baixar rapidamente a temperatura da peça de plástico. Finalmente o molde é aberto e a peça é ejetada por meio de ar comprimido, pela ação de molas ou removida manualmente. O molde é depois fechado e fica pronto para outro ciclo.

Como qualquer processo de fabrico, a moldagem por injeção tem vantagens e desvantagens. Tem como principais vantagens; elevada cadência de produção; qualidade das peças e bom acabamento superficial; baixo custo; é um processo altamente automatizado; e podem produzir-se formas complicadas. Apresenta como principais desvantagens o elevado custo do equipamento (que faz com que seja necessário produzir um grande volume de peças) e é um processo que tem de ser rigorosamente controlado para que se obtenham produtos de qualidade [2].

2.4.2. Tecnologia MuCell

Antes do aparecimento da tecnologia MuCell, os processos de fabrico de espumas de polímeros originavam células com diâmetros superiores a 0,25 milímetros, fazendo assim com que estes materiais não fossem viáveis pois perdiam muita da sua resistência mecânica. Esta tecnologia permite a produção contínua de espumas de polímeros com microcélulas com diâmetros compreendidos entre 1 e 100 microns, como exemplifica a Figura 2.4, e uma densidade de células de 10^9 a 10^{15} por centímetro cúbico. Foi desenvolvida pelo MIT no início dos anos 80, é um processo de redução de densidade de polímeros, que decorre durante a fase de injeção, e é baseado na formação de células gasosas micrométricas [1].

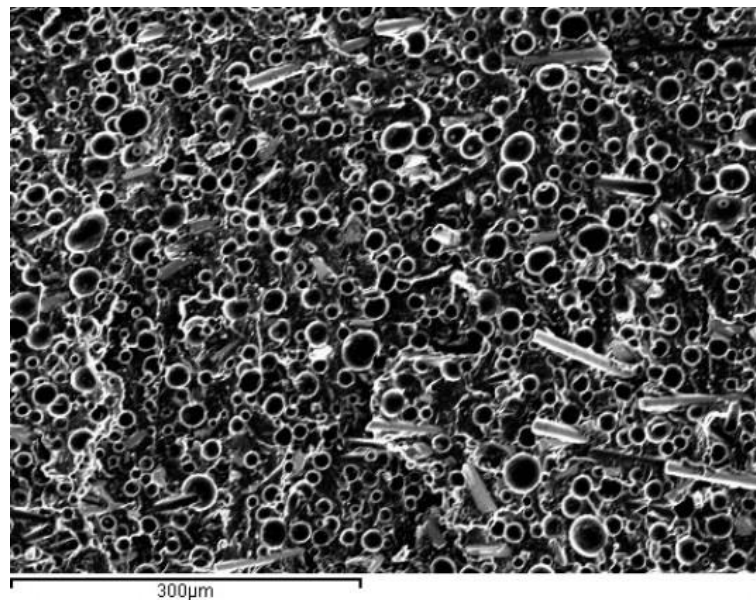


Figura 2.4. Morfologia de uma espuma de PP T20 obtida com a tecnologia MuCell

Segundo a Trexel, empresa que comercializa esta tecnologia, as reduções de peso típicas são de 5,5% a 12%, mas podem atingir os 35% combinando redução da densidade e alterações no *design*. Também o tempo do ciclo (Figura 2.5), a pressão de injeção e o tamanho das máquinas podem ser reduzidos para metade quando comparados com o processo de moldagem por injeção convencional. As melhorias de qualidade são normalmente superiores a 50%, se forem considerados parâmetros como o nivelamento e o empenamento.

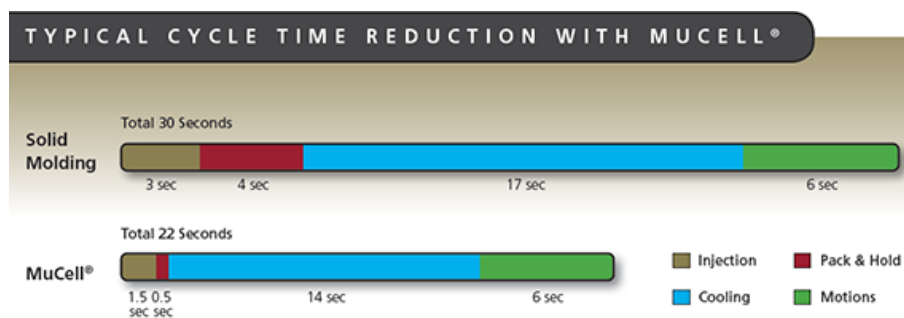


Figura 2.5. Tempos de ciclo com e sem a tecnologia MuCell

O processo de injeção de uma espuma de polímeros segue quatro passos básicos [8], como o demonstram a Figura 2.6 e a Figura 2.7:

Dissolução do gás: um fluido supercrítico (SCF) de um gás atmosférico, como o azoto (N_2) ou o dióxido de carbono (CO_2) é injetado no polímero através do cilindro de modo a formar uma solução monofásica (de SCF

e polímero). O equipamento concebido para este processo deve permitir uma taxa de dissolução rápida.

Nucleação: é formada uma grande quantidade de núcleos (várias ordens de grandeza superior aos processos convencionais) onde as células crescem. É necessária uma grande e rápida queda de pressão para que a distribuição seja uniforme.

Crescimento celular: as células expandem-se pela difusão do gás. As condições de processamento fornecem a pressão e a temperatura necessárias para o crescimento celular.

Modelação: o *design* do molde -Figura 2.8 - controla a forma final do componente.

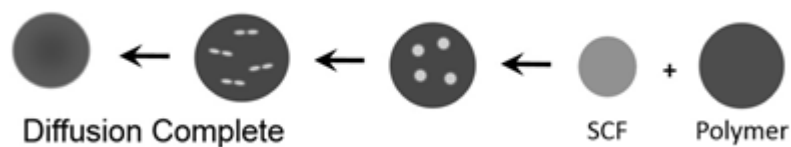


Figura 2.6. Processo de difusão do gás no polímero

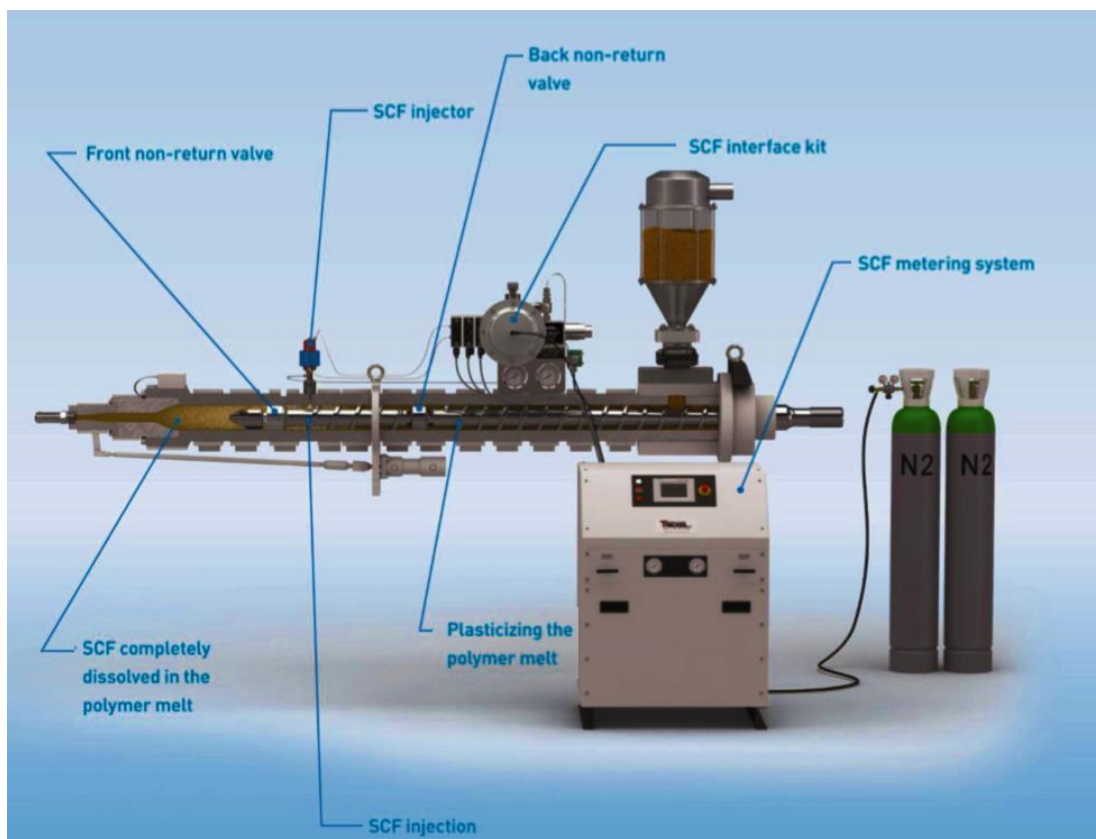


Figura 2.7. Máquina de injeção de materiais plásticos com tecnologia MuCell

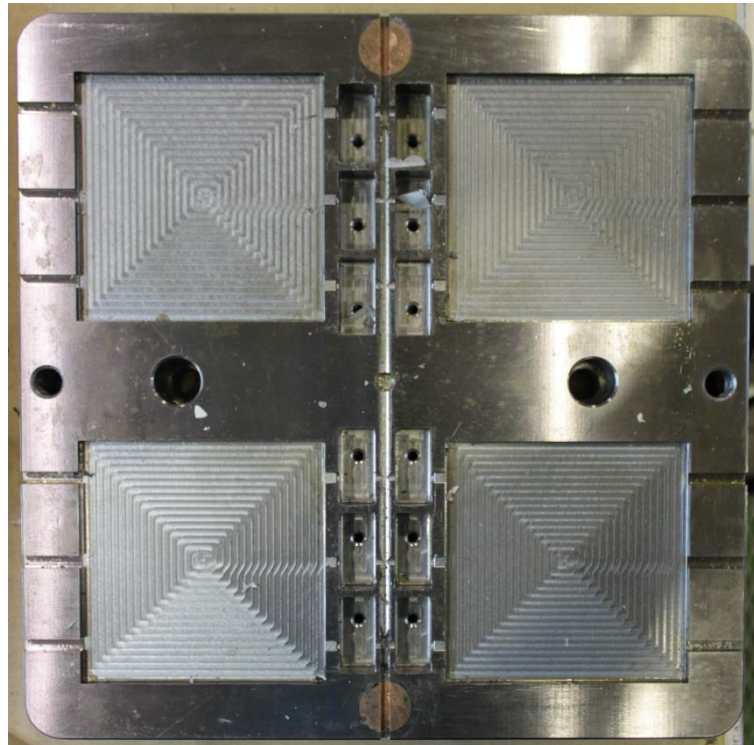


Figura 2.8. Molde utilizado no fabrico de placas com 100 x 100 x 4 mm de tamanho

Todos estes passos devem ocorrer numa máquina de parafuso alternativo para produzir com sucesso os componentes desejados. A temperatura e pressão devem ser mantidas dentro de um certo intervalo de valores para evitar a pré formação da espuma. A nucleação ocorre quando a solução é injetada no molde, onde a velocidade de queda de pressão deve ser superior a 1 MPa/s. As células podem crescer ou manter a sua dimensão durante o enchimento do molde, dependendo das condições de injeção.

A Figura 2.9 mostra a injetora utilizada na fabricação dos provetes utilizados neste estudo, localizada nas instalações na empresa GECO, em Leiria, e adaptada para funcionar com a tecnologia MuCell.

Os parâmetros de fabrico das placas utilizado encontram-se no ANEXO A.



Figura 2.9. Injetora localizada nas instalações da empresa GECO

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A fim de estudar os parâmetros definidos este trabalho foram fabricadas, na empresa GECCO, várias placas com 100 x 100 mm de cada tipo de material com a tecnologia MuCell, como identifica a Tabela 3.1. No processo de fabrico das mesmas, todas tiveram um tempo de arrefecimento de 60 segundos.

Tabela 3.1. Materiais e parâmetros em estudo

Material	Espessura [mm]	Pressão de injeção [bar]	Pressão de manutenção [bar]	N ₂ [wt%]
ABS	2	120	8	0
				0,6
	4	160	8	1
				0
PP	2	100	10	0,6
				1
	4	100	10	0
				0,5
PP T20	2	100	8	1
				0
	4	100	8	0,5
				1

3.1. Ensaio de tração

3.1.1. Equipamento e condições

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de construções mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). O equipamento utilizado foi a máquina de ensaio eletromecânica Shimadzu AG-10 com a célula de carga de 5KN e um extensómetro da

mesma marca - Figura 3.1. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente, em controlo de deslocamento e com uma velocidade de 5mm/min.

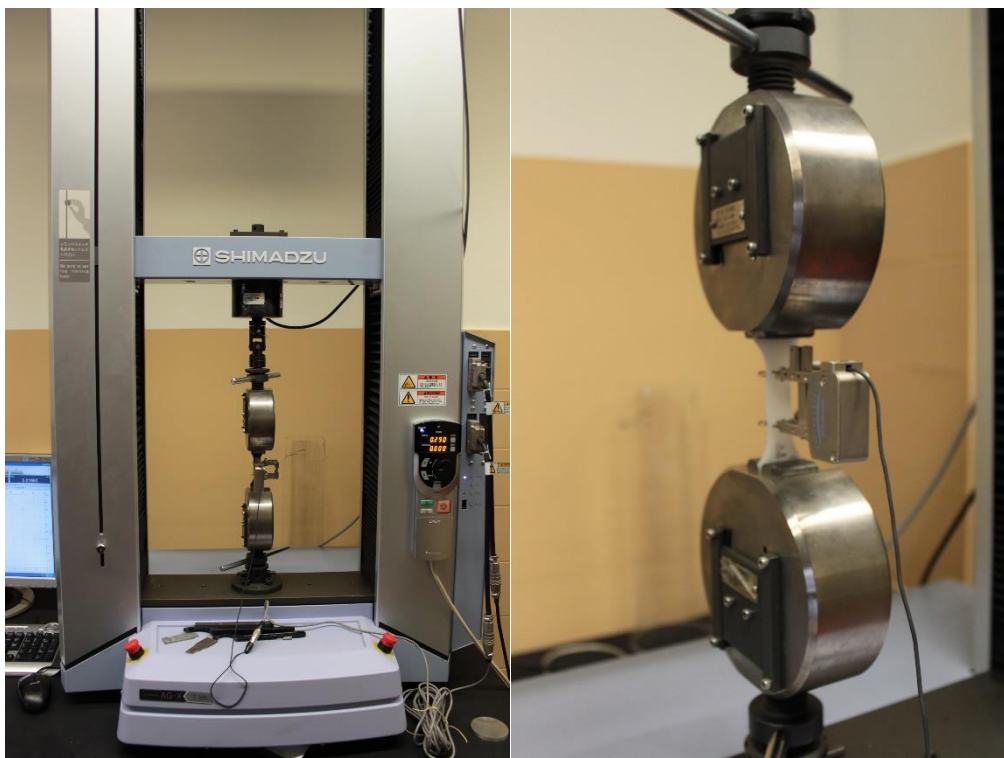


Figura 3.1. Máquina de ensaios Shimadzu AG-10 e extensómetro

Os dados como a força, deslocamento do travessão da máquina e deslocamento do extensómetro foram adquiridos através do *software* operacional Trapezium X e depois exportados para um ficheiro csv. Apesar deste ter a capacidade de cálculo, o tratamento dos dados foi efetuado no programa Excel.

A tensão à qual o provete foi sujeito, definida por σ , foi calculada segundo a equação (3.1) sabendo a força aplicada, F , e a secção transversal do mesmo, A :

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (3.1)$$

Já a deformação do provete, ε , foi calculada através da equação (3.2) com base no comprimento inicial do extensómetro, L_0 , e no deslocamento do mesmo, ΔL :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (3.2)$$

3.1.2. Provetes

Foram utilizados entre 4 a 8 provetes de cada tipo de material com o objetivo de obter pelo menos 3 ensaios válidos e conclusivos. Os provetes foram obtidos cortando as placas fornecidas em 4 retângulos com 25 mm de largura, que posteriormente foram fresados numa máquina de CNC de forma a obterem a forma e as dimensões (em mm) representadas na Figura 3.2.

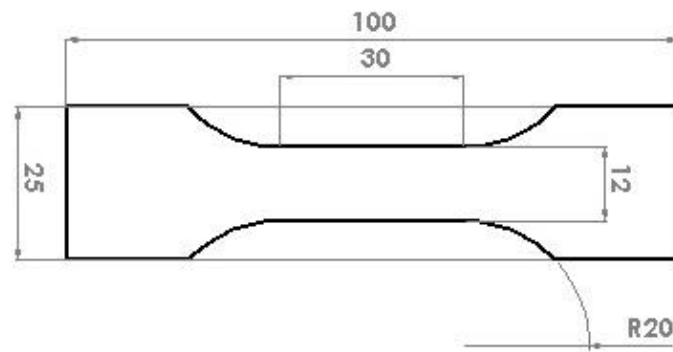


Figura 3.2. Geometria e dimensões de um provete de ensaio de tração

3.2. Ensaio de impacto

3.2.1. Equipamento e condições

Os ensaios de impacto foram também realizados no laboratório de construções mecânicas do DEM da FCTUC. Para tal foi utilizada a máquina de impacto por queda de peso Ceast 9340 da Instron com uma célula de carga de 10 kN - Figura 3.3. Variando a altura, h , da cabeça de impacto (hemisférica, com uma massa, m , de 3,7 kg e um diâmetro de 10 mm) entre os 5,5 e os 11 cm obtiveram-se energias de teste de aproximadamente 2 e 4 J, calculadas pela equação (3.3):

$$E = m \cdot g \cdot h. \quad (3.3)$$

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e utilizando o sistema de apoio livre sob um apoio circular com 40 mm de diâmetro - Figura 3.4.

O *software* Ceast VIEW 5.94 permitiu obter os dados e calcular os resultados relativos a cada ensaio: força, deformação, energia absorvida e velocidade. Estes foram exportados para o programa Excel para serem devidamente analisados.



Figura 3.3. Máquina de ensaios Instron Ceast 9340



Figura 3.4. Sistema de ajuste de altura e apoio livre do provete

3.2.2. Provetes

Para estes ensaios foram testados entre 2 a 4 provetes por tipo de material, de forma a obter pelo menos 2 ensaios válidos e conclusivos. Estes tinham geometria quadrangular com 100 mm de lado.

3.2.3. Áreas de dano

Para a obtenção do valor das áreas de dano foi inicialmente utilizado um sistema de ultrassons (C-Scan). No entanto, este método não forneceu valores aceitáveis e optou-se por fotografar os provetes em contraluz. Assim a medição do dano foi feita por contagem de pixels através do programa Photoshop CS5 e utilizando dois autocolantes com 1 e 4 cm² de área em cada provete de forma a ter valores de referência, como demonstram a Figura 3.5 e Figura 3.6. Uma desvantagem deste método é não permitir medir as áreas de dano dos provetes mais escuros, como é o caso dos de PP T20.

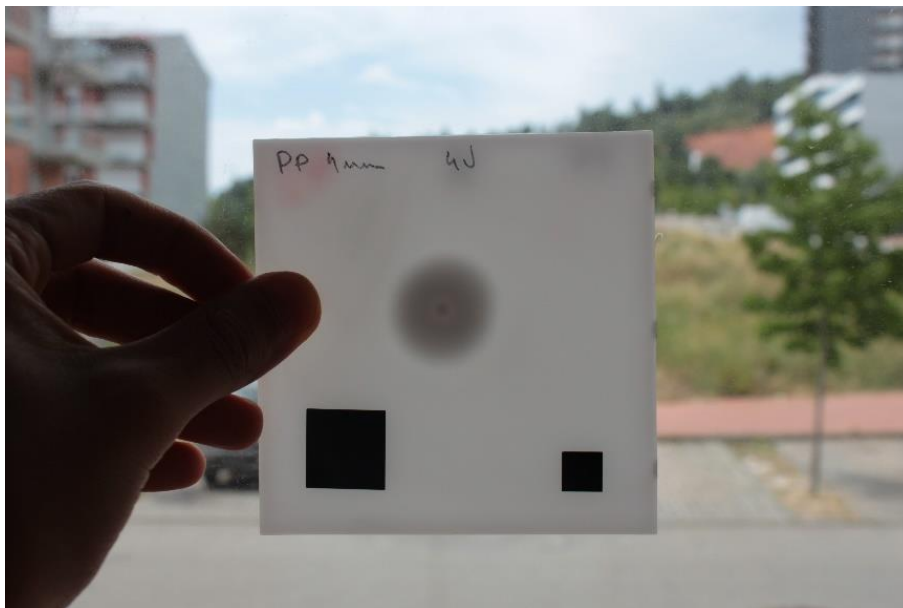


Figura 3.5. Fotografia em contraluz de um provete de PP sujeito a um impacto de 4J

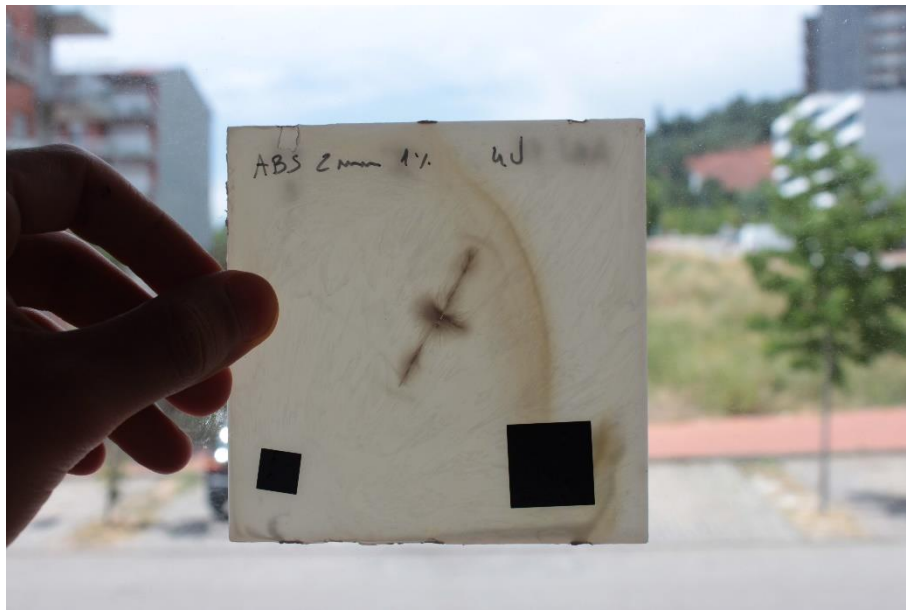


Figura 3.6. Fotografia em contraluz de um provete de ABS com 1% de N₂ sujeito a um impacto de 4J

3.2.4. Resistência residual

Depois de medidas as áreas dos danos provocados pelos ensaios de impacto, foram feitos ensaios de resistência residual, com uma máquina de ensaios à tração, Instron 4206, também localizada no laboratório previamente referido - Figura 3.7.



Figura 3.7. Máquina de ensaios Instron 4206

Os provetes foram cortados de forma a ficarem com aproximadamente 50 mm de largura e conter a zona de impacto ao centro. Foram depois maquinados, utilizando a fresadora que se encontra instalada na oficina do DEM, de forma a ficarem com 45 mm de largura - Figura 3.8. A realização destes ensaios foi feita com controlo de deslocamento, a uma velocidade de 5mm/min e à temperatura ambiente.



Figura 3.8. Maquinação dos provetes para ensaio de resistência residual

O *software* Bluehill da Instron permitiu a determinação imediata dos valores da tensão residual máxima, uma vez que a secção transversal do provete é um dado necessário à realização dos ensaios.

3.3. Densidade

Saber a densidade, ou massa volúmica, de uma material é um dado fundamente para o cálculo das propriedades específicas de uma material. Para determinar a densidade dos materiais em questão, inicialmente optou-se pela utilização do princípio de Arquimedes, em a submersão da placa num tanque de água iria fornecer o volume da mesma. No entanto, por se tratar de um material com poros, a infiltração da água nas células do material invalidou os resultados destes testes.

A fim de obter valores válidos para as densidades dos materiais, optou-se por medir cada placa em 9 pontos (3 para o comprimento, 3 para a largura e 3 para a espessura) e calcular um valor médio para o volume. Seguidamente, as placas foram pesadas na balança de precisão (0,1 mg) AND GH-202, Figura 3.9, permitindo assim determinar a massa volúmica destas.



Figura 3.9. Balança de precisão AND GH-202

3.4. DMA

DMA (Dynamic Mechanical Analysis) é uma técnica onde se pode avaliar o comportamento mecânico de um material, quando sujeito a um programa de temperaturas controladas e sob o efeito de uma força mecânica variável no tempo. Uma análise de DMA depende, como é de esperar, do modo de operação como se pode verificar pela Figura 3.10.

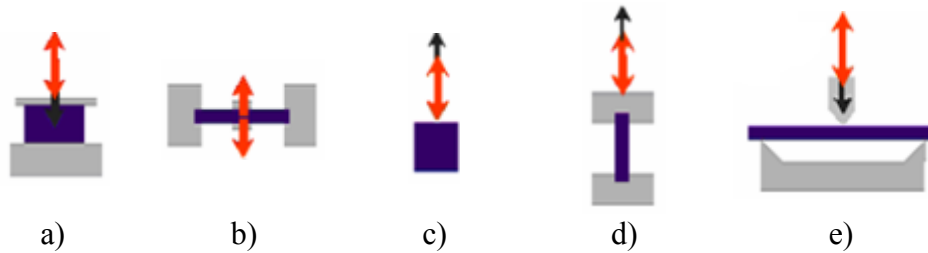


Figura 3.10. Modos de operação num ensaio DMA a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração; e) flexão em 3 pontos

Com este tipo de análise pode estudar-se a variação do módulo de elasticidade (E) em função da temperatura, bem como obter-se a temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea é aquela à qual existe passagem do estado vítreo para um estado “maleável”.

Os ensaios foram realizados com o equipamento ilustrado na Figura 3.11 em modo de flexão em 3 pontos com variação de temperaturas entre os 20°C e os 120 °C. Tiveram lugar na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG IPL).

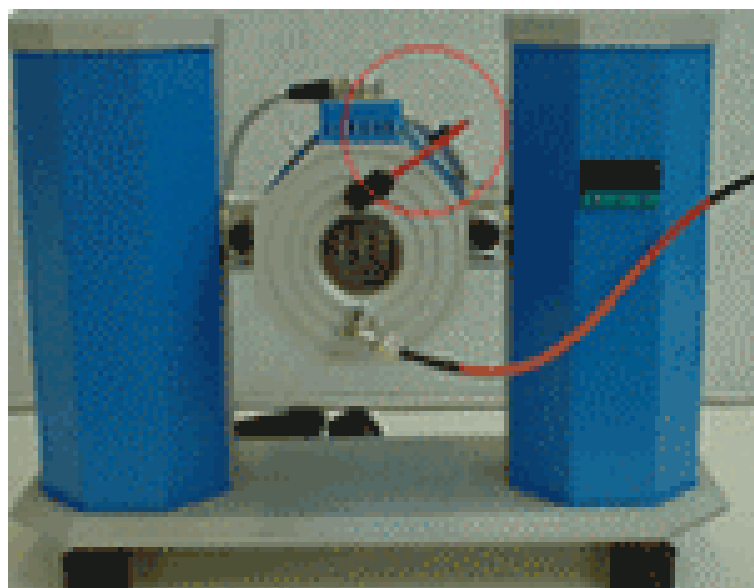


Figura 3.11. Equipamento de ensaio de DMA utilizado nos ensaios

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados com controlo de deslocamento, a uma velocidade de 5 mm/min e à temperatura ambiente como estabelece a norma, para ensaios de tração em plásticos, ASTM D638-10 [9].

Nas Figuras Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 estão representadas curvas tensão – deformação resultantes dos ensaios à tração efetuados aos componentes de 2 mm de espessura em estudo. Como se pode observar, os provetes obtidos com a tecnologia MuCell continuam a apresentar curvas parecidas com as dos materiais sem poros, no entanto suportam uma tensão máxima menor e acabam por chegar à rotura com uma deformação menor. Este comportamento é justificado pela existência de poros no material. Assim, a secção real do provete, isto é, a área que vai suportar a carga a que este está sujeito, é menor, pelo que é natural que a carga máxima suportada por este seja menor.

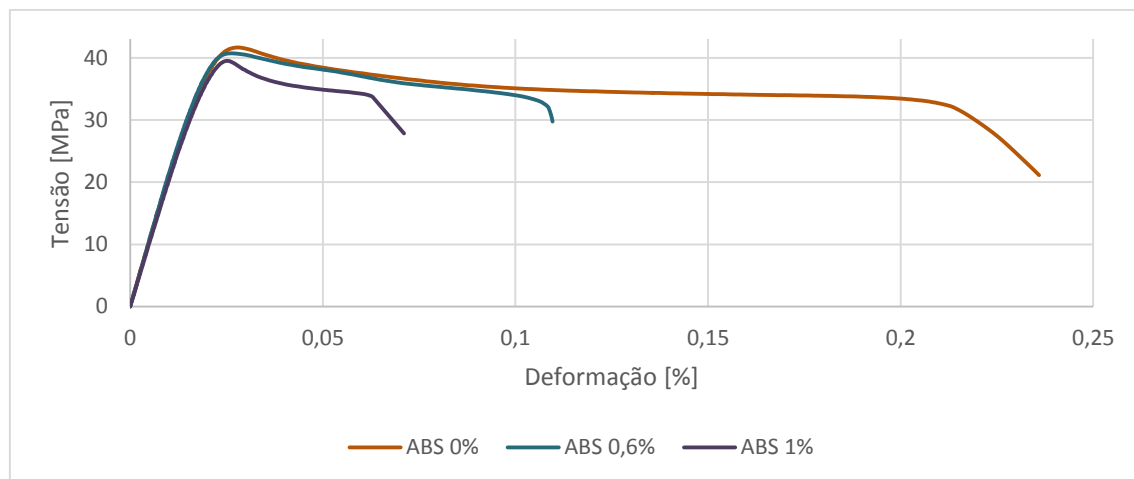


Figura 4.1. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de ABS

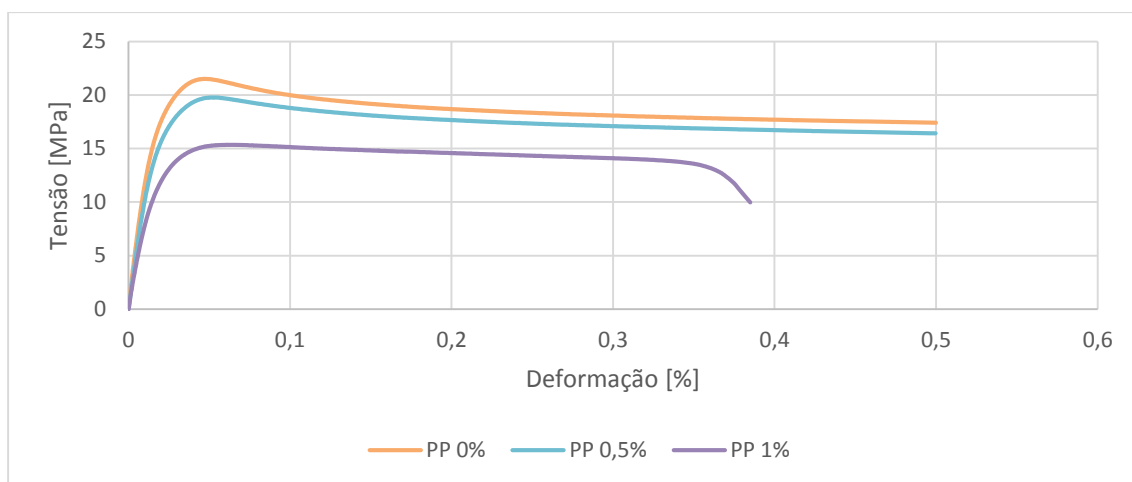


Figura 4.2. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de PP

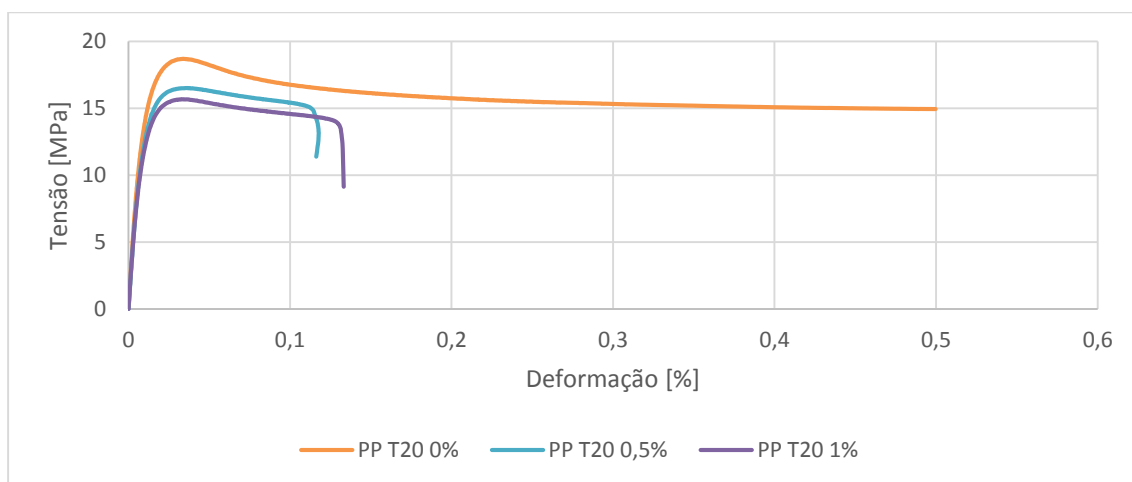


Figura 4.3. Curvas tensão – deformação para provetes de 2 mm de PP T20

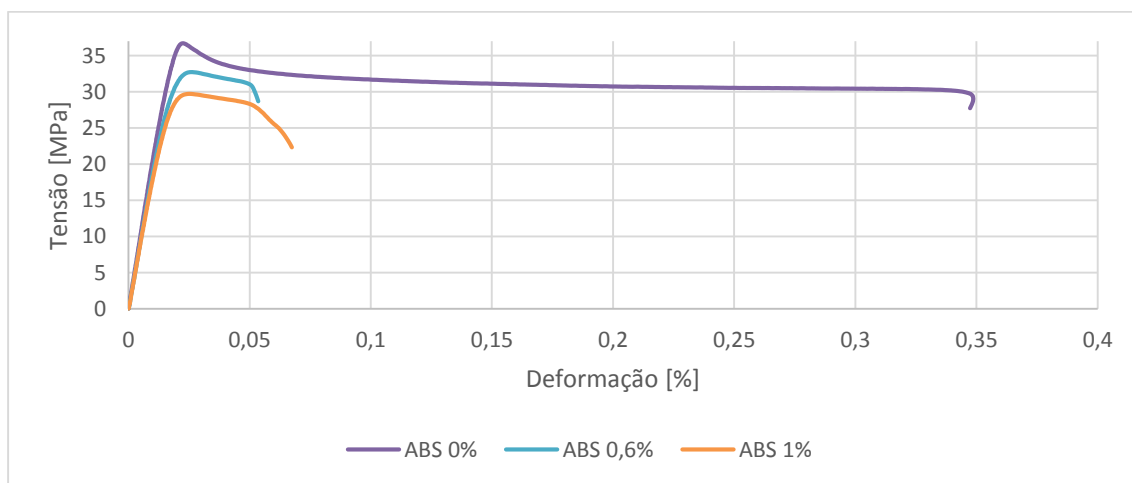


Figura 4.4. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de ABS

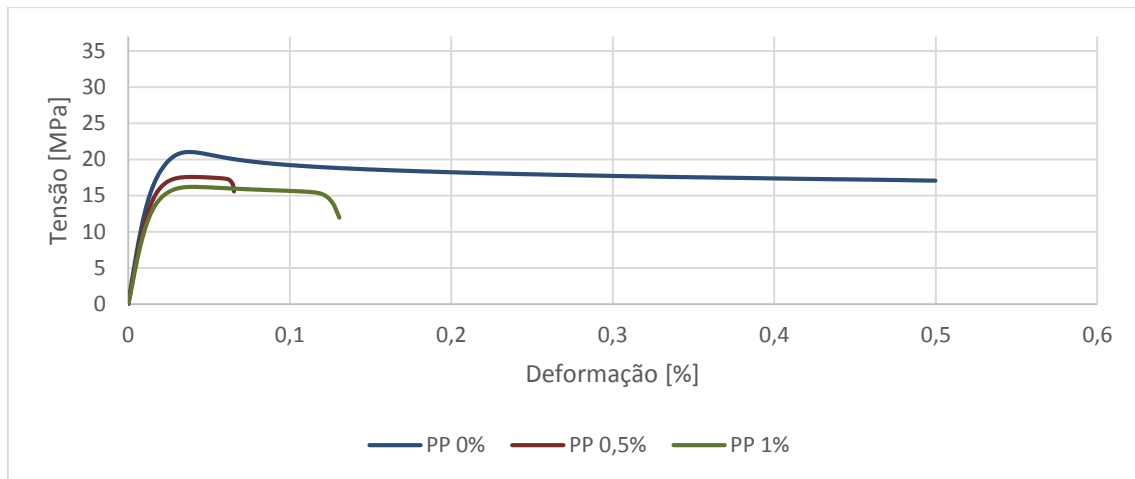


Figura 4.5. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de PP

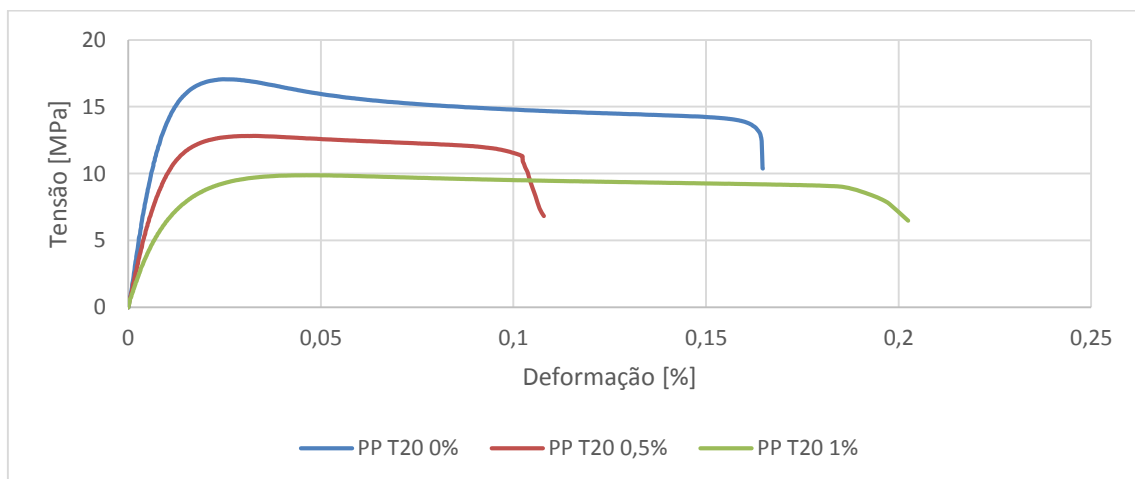


Figura 4.6. Curvas tensão – deformação para provetes de 4 mm de PP T20

Também nos ensaios aos provetes com 4 mm de espessura, os efeitos da MuCell nos resultados são semelhantes - Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.

Na Tabela 4.1 estão representados os valores da tensão máxima e do módulo de Elasticidade de cada material. De uma forma geral, verifica-se que ambos diminuem com o aumento da percentagem de azoto no material. Verifica-se também que o efeito da diminuição da tensão máxima suportada pelo material é mais evidente nos provetes mais grossos. Isto explica-se pela melhor dissolução do gás no polímero nos provetes mais grossos em relação aos mais finos. Os mais finos acabam por se assemelhar a um material tipo *sandwich*, com uma camada porosa no meio de duas camadas quase maciças - Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9.

Apesar de terem sido realizados ensaios para todos os materiais, para os componentes de ABS e PP T20 (2 mm) com 1% de N₂ os resultados não estão apresentados porque cientificamente não fazem sentido, pois apresentavam valores de resistência à tração superiores ao material sem gás.

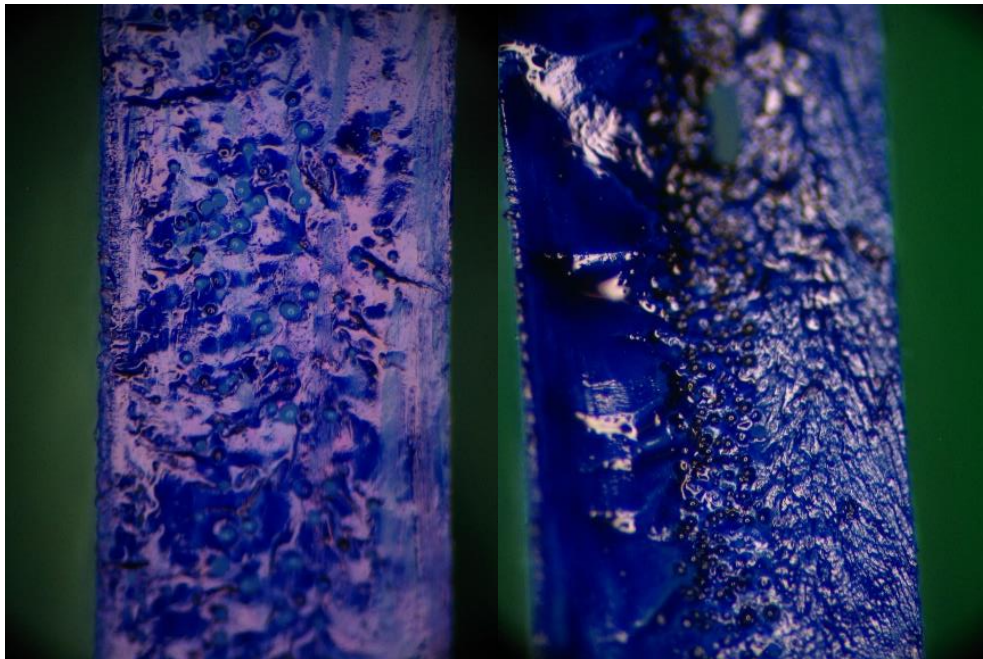


Figura 4.7. Provetes de ABS com 0,6% de N₂. Esquerda: 4mm; Direita: 2mm

Como se pode verificar por observação das FigurasFigura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 o tamanho das células existentes nos materiais testados é um relativamente superior aos valores micrométricos referidos na revisão bibliográfica, tal pode influenciar os resultados obtidos. A dimensão das células obtidas pode explicar-se pela falta de qualidade do sistema de enchimento do molde utilizado, uma vez que este teve origem no reaproveitamento de um já existente. Pode também dever-se ao facto de ter sido utilizada injeção com o molde frio, dificultando assim o processo de difusão do gás.

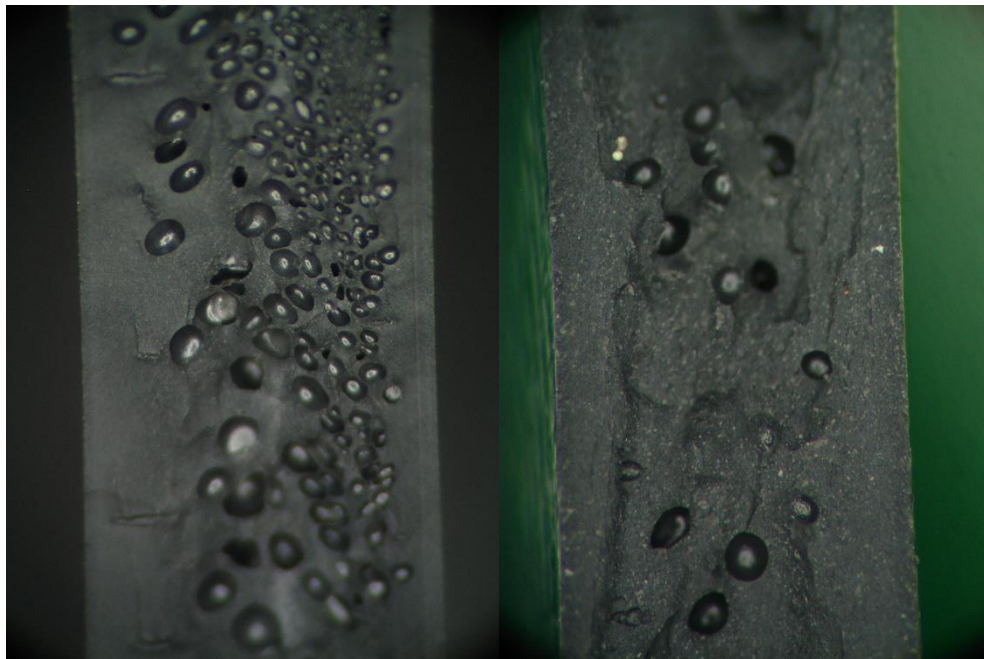


Figura 4.8. Provetes de PP T20 Esquerda: 4mm 0,5%; Direita: 2mm 1%



Figura 4.9. Vista de fratura de um componente fabricado em PP T20

Tabela 4.1. Tensão máxima e módulo de elasticidade dos materiais estudados

Material	Espessura	N ₂ [wt%]	Tensão Máx. [MPa]	E [MPa]
ABS	2	0	41,2	2010,4
		0,6	37,5	1888,7
		1	-	-
	4	0	37,6	2033,7
		0,6	32,1	1828,4
		1	-	-
PP	2	0	21,5	1305,1
		0,5	19,5	1119,8
		1	14,4	761,9
	4	0	20,8	1292,8
		0,5	15,9	1115,7
		1	15,6	1034,7
PP T20	2	0	18,7	1858,3
		0,5	16,9	1729,1
		1	-	-
	4	0	17,8	2010,8
		0,5	13,4	1453,0
		1	9,3	769,1

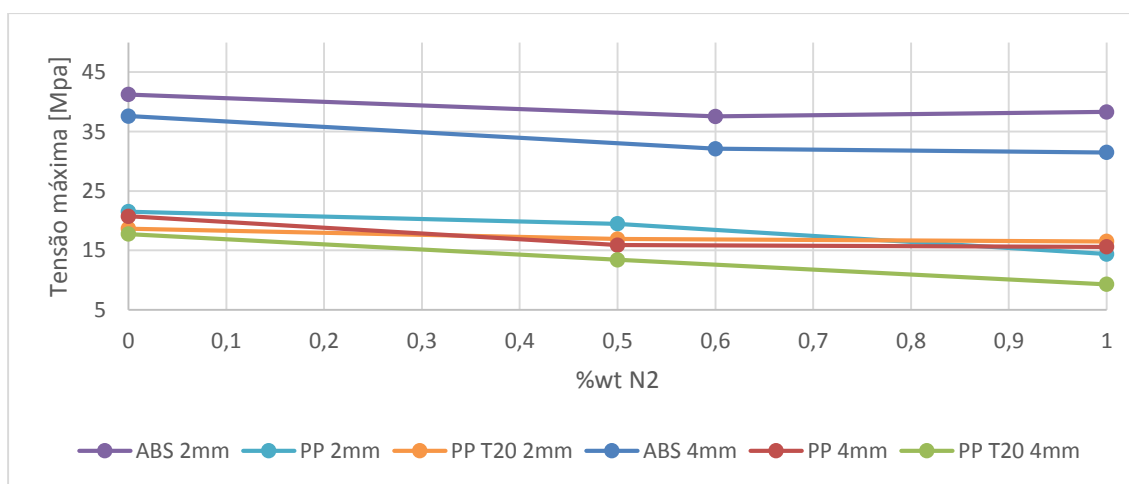


Figura 4.10. Tensão máxima em função da porcentagem de azoto dissolvido

Uma análise mais detalhada Tabela 4.1 e ao gráfico da Figura 4.10 revela que os valores de tensão máxima suportada pelo material podem baixar entre 9% a 33% dependendo

do material e da quantidade de gás que tem dissolvido. No entanto, mais à frente (4.3) vão ser analisadas as propriedades específicas a fim de poder avaliar o valor real da perda (ou ganho) de resistência.

4.2. Ensaio de impacto

De forma a estudar o comportamento das placas fabricadas com a tecnologia MuCell quando solicitadas a cargas de impacto, foram realizados ensaios em que se variou a energia de impacto.

A massa considerada nos ensaios foi constante e igual a 3,7 Kg. Este valor corresponde à soma de massas da cabeça de impacto, do carrinho e pesos. Na Tabela 4.2 são apresentados os diferentes valores de energia considerados nos vários ensaios bem como as velocidades e alturas correspondentes.

Todos os resultados adquiridos na realização destes ensaios podem ser consultados no ANEXO B.

Tabela 4.2. Altura e velocidade de queda em função da energia de impacto

Energia [J]	Altura [m]	Velocidade teórica [m/s]
2	0,055	1,04
4	0,110	1,47

4.2.1. Força máxima

Na Figura 4.11 são apresentadas curvas típicas de carga versus deslocamento, neste caso em concreto para placas de ABS com 2 mm de espessura e com 0%, 0,6% e 1% de azoto, num ensaio de 2J.

Pode verificar-se que a carga aumenta de forma linear até ao ponto de força máxima de início de dano. A força máxima representa o valor máximo de carga que o material suporta sem se danificar.

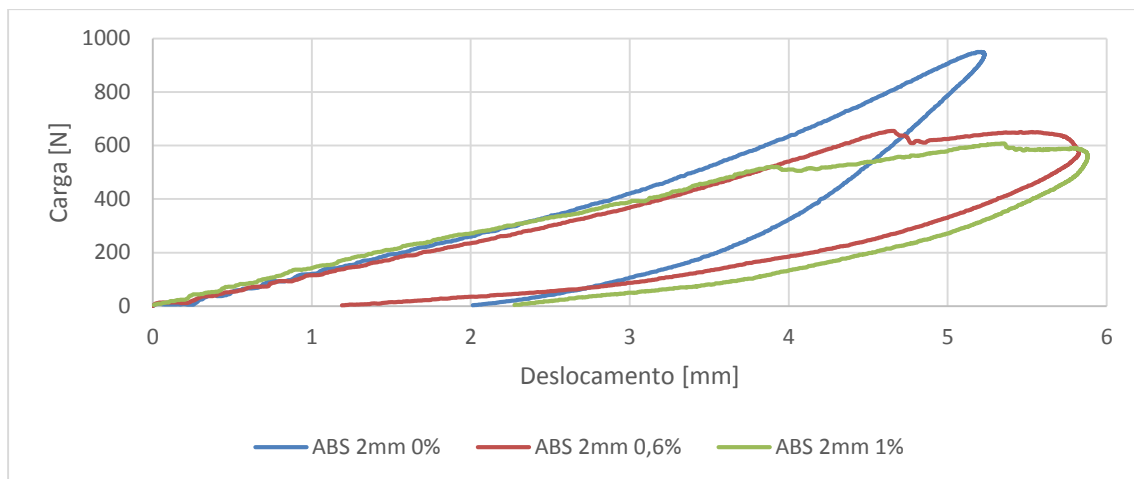


Figura 4.11. Curvas típicas de carga versus deslocamento num ensaio de impacto

A análise de todas as curvas carga versus deslocamento permitiu criar os gráficos das Figura 4.12 e Figura 4.13, onde se verifica que o valor da força máxima é proporcional à energia de impacto e à espessura da placa e é inversamente proporcional à quantidade de gás dissolvido no material. Verifica-se ainda que o componente de ABS com 4 mm de espessura é o que suporta mais força e o PP T20 é o que mais facilmente fica danificado.

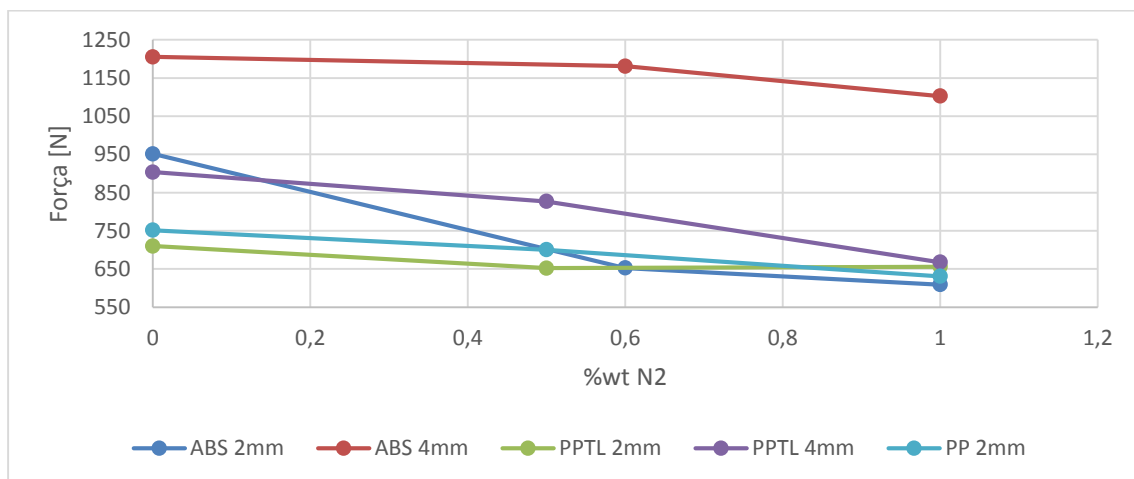


Figura 4.12. Força máxima em função da % de N2 para ensaios de 2J

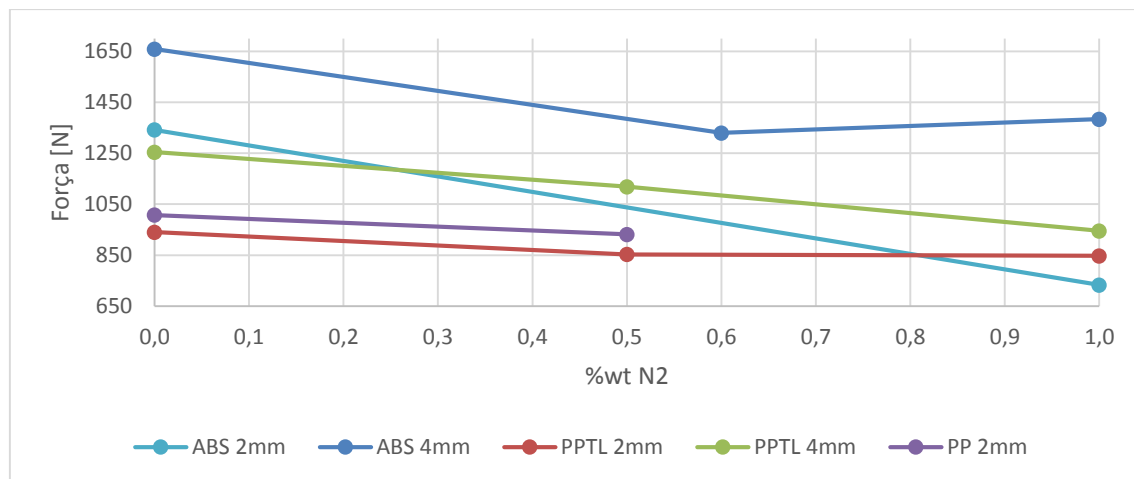


Figura 4.13. Força máxima em função da % de N2 para ensaios de 4J

4.2.2. Energia absorvida

Na Figura 4.14 são apresentadas curvas típicas de energia em função do tempo, neste caso em concreto para placas de ABS com 2 mm de espessura e com 0%, 0,6% e 1% de azoto, num ensaio de 2J.

É possível observar que o aumento da energia de impacto, vai promover o dano e conseqüentemente diminuir a energia restituída pelo ressaltado da cabeça de impacto.

Os pontos máximos representam as energias dos ensaios, já os “patamares” finais representam a energia absorvida por cada provete.

A análise de todas as curvas de energia em função do tempo permitiu criar os gráficos das Figura 4.15 e Figura 4.16, onde se verifica que a quantidade de energia absorvida aumenta com o aumento da quantidade de gás dissolvido no material. Verifica-se também que as placas com 2 mm de espessura absorvem mais energia que as placas mais grossas e ainda que o componente que mais energia absorve é o PP T20 com 2mm e que o ABS com 4mm é o que mais energia restitui ao sistema.

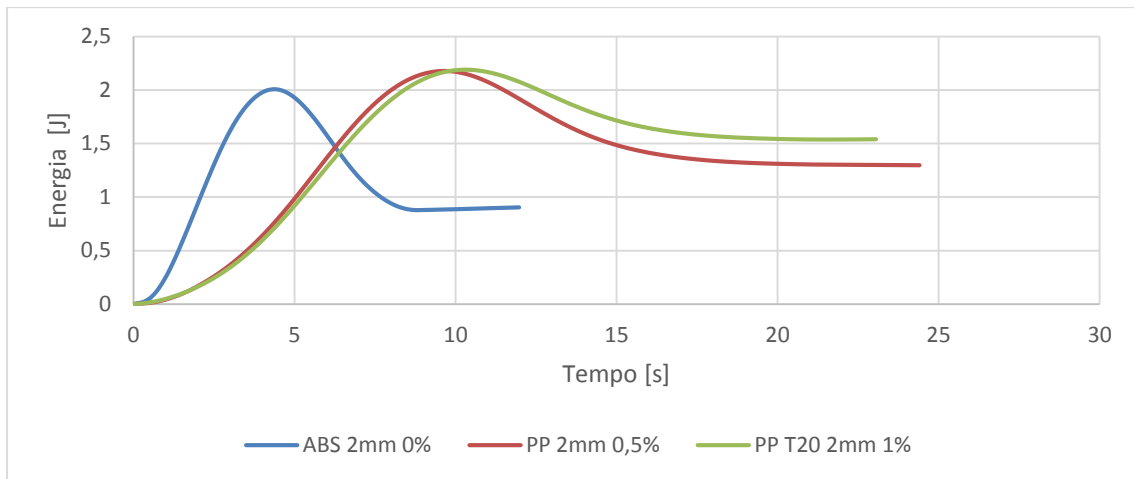


Figura 4.14. Energia em função do tempo

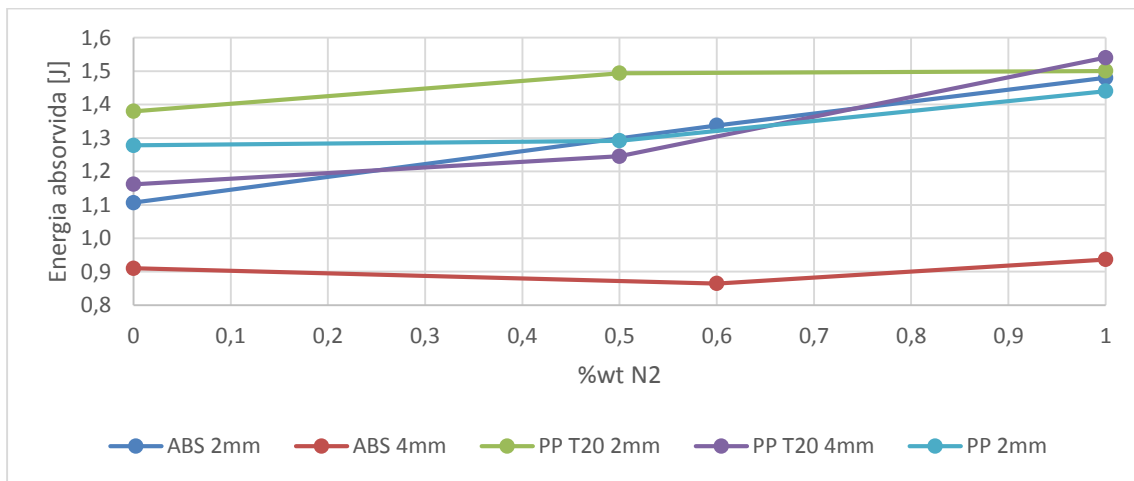


Figura 4.15. Energia absorvida em função da % de N₂ para ensaios de 2J

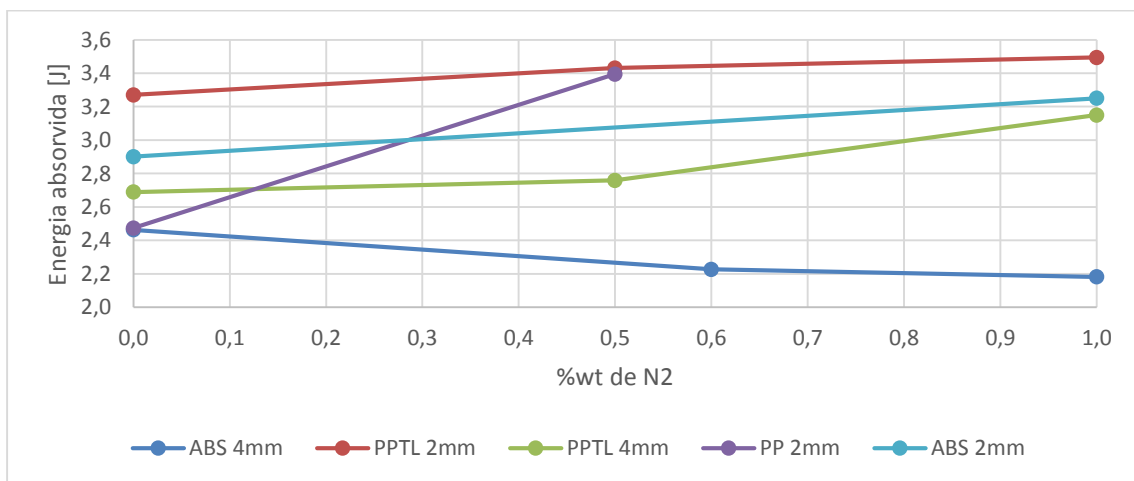


Figura 4.16. Energia absorvida em função da % de N₂ para ensaios de 4J

4.2.3. Áreas de dano

Depois de fotografados todos os provetes claros em contraluz e depois de a contagem de pixéis, foi possível criar os gráficos das Figura 4.17 e Figura 4.18 onde estão representados as áreas dos danos provocados pelos ensaios de impacto, de 2 e 4 J respetivamente, mais uma vez, em função da % de azoto dissolvido no material. Como se pode verificar, o PP com 4 mm de espessura é o provete no qual resultam maiores danos, já o ABS também com 4 mm é o material que apresenta os danos mais pequenos. Tal deve-se ao facto de ser o provete com maior valor de força máxima.

À semelhança do que acontece com a quantidade de energia absorvida, quanto maior for a quantidade de azoto no material, maior é o dano.

Uma vez que estes ensaios foram feitos através da obturação de imagens em contraluz, não foi possível a determinação das áreas de dano para o PP T20. No entanto, como é o material que apresenta melhor capacidade de absorção de energia, estima-se que estas sejam ligeiramente superiores às áreas de dano observadas nas placas de PP.

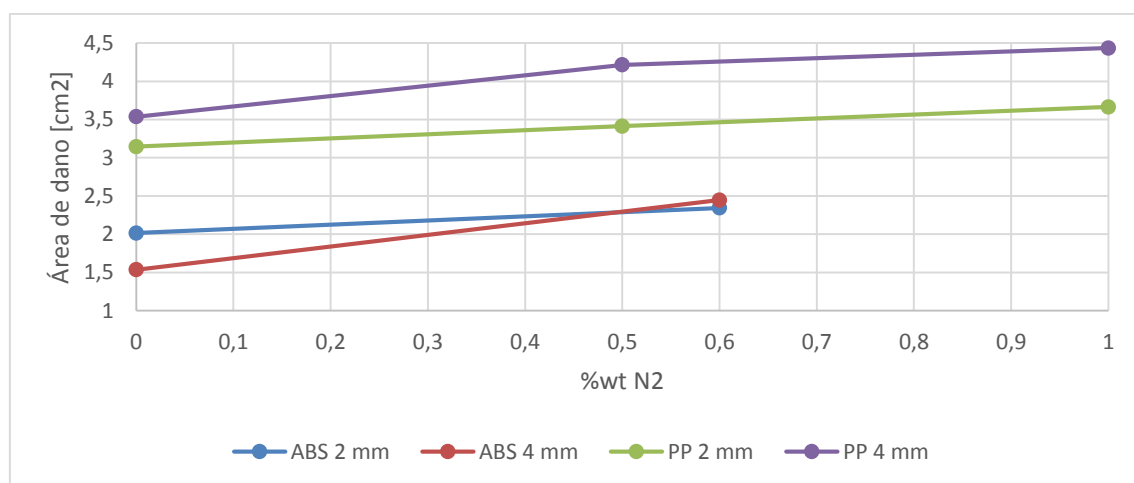


Figura 4.17. Áreas de dano da % de N₂ para ensaios de 2J

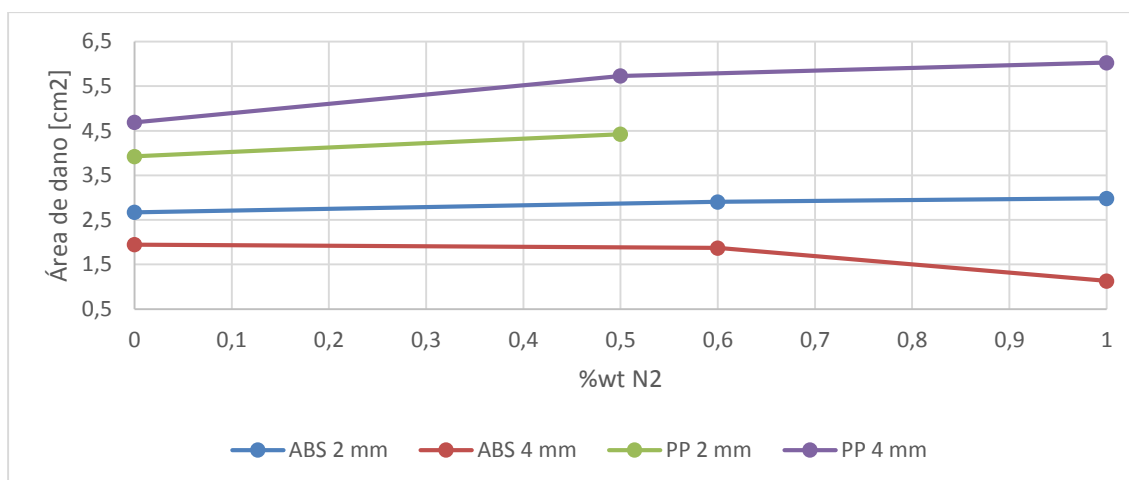


Figura 4.18. Áreas de dano da % de N₂ para ensaios de 4J

4.2.4. Resistência residual

A Tabela 4.3 permite fazer a comparação dos valores da tensão máxima suportada pelos materiais antes e depois de sofrerem impactos com energias de 2 e 4 J. Tendo também em conta as áreas dos danos provocados, verifica-se que quanto maior for a energia de impacto/absorvida (e conseqüente área de dano) menor é a resistência residual. Como se verificou também nos ensaios anteriores, quanto maior for a quantidade de gás no material, menor a resistência residual.

Tabela 4.3. Resistência residual dos materiais estudados

Material	Espessura [mm]	N₂ [wt%]	Tensão Máx. [MPa]	Resistência residual para 2J [MPa]	Resistência residual para 4J [MPa]
ABS	2	0	41,2	37,8	35,9
		0,6	37,5	30,3	24,1
		1	-	26,8	19,5
	4	0	37,6	35,6	35,2
		0,6	32,1	29,8	26,3
		1	-	28,6	19,5
PP	2	0	21,5	19,4	18,8
		0,5	19,5	15,1	16,7
		1	14,4	13,8	-
	4	0	20,8	19,5	19,2
		0,5	15,9	13,8	11,2
		1	15,6	-	-
PP T20	2	0	18,7	16,4	16,1
		0,5	16,9	14,1	13,8
		1	-	-	13,1
	4	0	17,8	15,6	14,6
		0,5	13,4	10,8	10,9
		1	-	9,2	8,1

4.3. Densidade

Na Tabela 4.4 estão representadas as densidades e as propriedades específicas de cada material. Como foi referido na Revisão Bibliográfica, MuCell é uma tecnologia de redução da densidade dos materiais, e é isso que se verifica na tabela abaixo. Quanto maior a percentagem de azoto, menor a densidade. A maior diminuição é para o PP T20 com 4mm e com 1% de azoto, 11,26%, e a menor é também para o PP T20 mas desta vez com 2mm de espessura e 0,5%.

Verifica-se também que, ao nível das propriedades específicas, a diminuição do valor da tensão máxima e do módulo de elasticidade não é muito significativa, principalmente porque esta tecnologia não é utilizada em componentes estruturais.

Verifica-se ainda que ao nível do ABS com 4 mm e 1% de azoto parece existir uma melhoria no módulo de elasticidade específico em relação ao material sem gás.

Tabela 4.4. Densidade e propriedades específicas dos materiais em estudo

Material	Espessura [mm]	N ₂ [wt%]	Densidade [g/cm ³]	Δ Densidade [%]	$\sigma_{\text{máx}}$ específica [MPa.m ³ /ton]	E específico [MPa.m ³ /ton]
ABS	2	0	1,046	0	39,43	1922,1
		0,6	0,998	4,59	37,64	1893,5
		1	-	-	-	-
	4	0	1,001	0	37,55	2030,9
		0,6	0,940	6,09	34,17	1945,0
		1	0,917	8,39	34,30	2102,9
PP	2	0	0,891	0	24,15	1464,8
		0,5	0,842	5,50	23,11	1329,7
		1	0,800	10,21	18,00	952,2
	4	0	0,848	0	24,47	1524,1
		0,5	0,807	4,83	19,72	1383,3
		1	0,794	6,37	19,66	1302,7
PP T20	2	0	0,976	0	19,15	1904,6
		0,5	0,955	2,15	17,71	1810,4
		1	0,944	3,28	17,50	1856,5
	4	0	0,941	0	18,88	3137,5
		0,5	0,887	5,74	15,12	1637,9
		1	0,835	11,26	11,14	921,3

4.4. DMA

Na Figura 4.19 é apresentada a variação do módulo de elasticidade dinâmico em função da temperatura. Tanto o aumento da temperatura como o aumento da quantidade de gás dissolvido no material são responsáveis pela diminuição da rigidez do mesmo. No entanto, no caso do ABS verifica-se que os provetes fabricados com a tecnologia MuCell têm uma temperatura de transição vítrea cerca de 10°C superior à do material maciço (80°C para o ABS maciço e 90°C para o ABS com MuCell).

Observa-se também que as temperaturas de transição vítrea do PP e do PP T20 (com ou sem a tecnologia MuCell para o caso do PP) são inferiores à temperatura ambiente, daí que estes materiais possam apresentar comportamentos viscoelásticos. No entanto, não convém utilizar estes materiais em aplicações sujeitas a temperaturas a 50°C, pois apresentam um módulo de elasticidade dinâmico relativamente baixo. Já o ABS pode ser usado até temperaturas próximas dos 70°C (maciço) ou 80°C (MuCell).

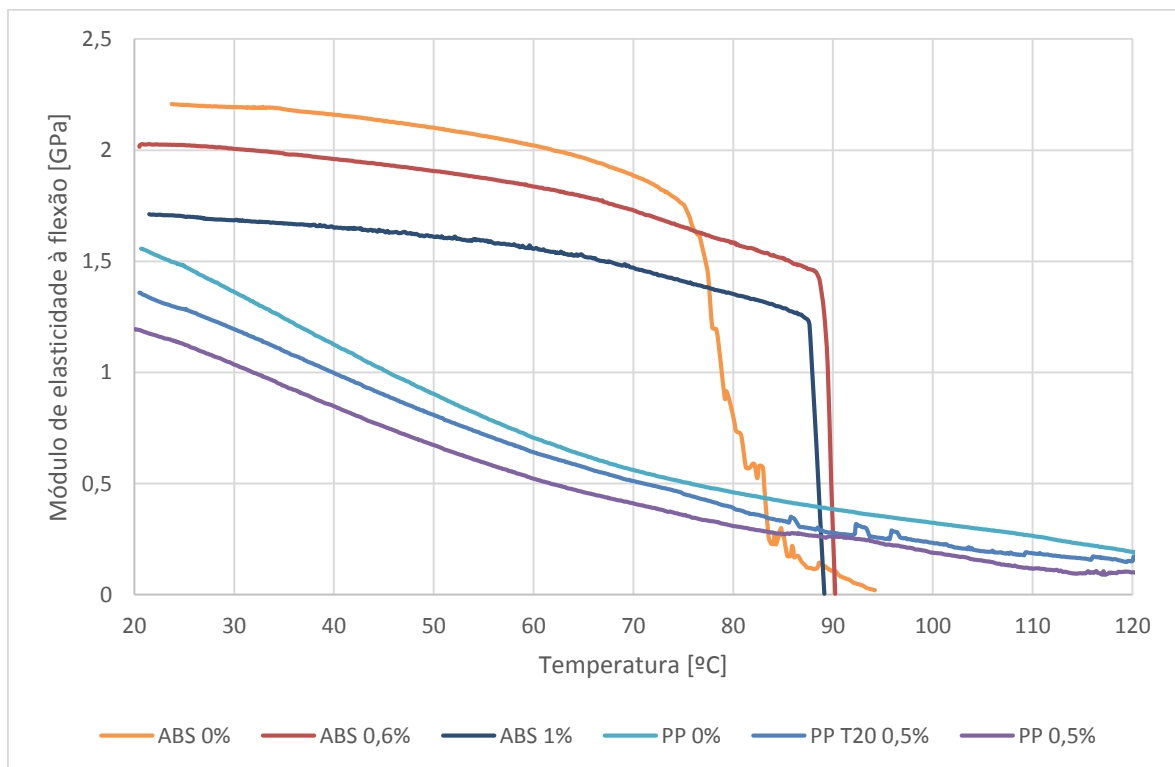


Figura 4.19. Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da temperatura

Por análise de Tabela 4.5 verifica-se ainda que, além de da diminuição do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da temperatura e da quantidade de gás, os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico são bastante aproximados.

Tabela 4.5. Variação do módulo de elasticidade à flexão em função da temperatura

Material	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]			Módulo de elasticidade estático [GPa]
	20°C	50°C	70°C	22°C
ABS 0%	2,21	2,10	1,89	2,03
ABS 0,6%	2,01	1,91	1,73	1,83
ABS 1%	1,71	1,61	1,47	-
PP 0%	1,56	0,90	0,56	1,29
PP 0,5%	1,19	0,68	0,41	1,12
PP T20 0,5%	1,36	0,81	0,51	1,45

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

No âmbito da realização desta dissertação foram tratados e ensaiados mais de 250 provetes. Provetes estes que tiveram origem em placas, com 100 x 100 mm e com 2 e 4 mm de espessura, produzidas com o recurso à tecnologia MuCell.

A análise realizada envolveu o estudo do comportamento dos materiais quando sujeitos a cargas de tração e de impacto e avaliou a variação do módulo de elasticidade à flexão em função da temperatura.

As principais conclusões deste trabalho são:

- ✓ A tecnologia MuCell permite de facto baixar o peso componentes, através de uma diminuição na densidade de aproximadamente 10% sem sacrificar em demasia a sua resistência à tração.
- ✓ Esta tecnologia permite ainda aumentar a capacidade de absorção de energia no impacto até 30% em relação ao material maciço, permitindo ainda que depois de danificado o componente ainda mantenha um valor de resistência residual aproximado do valor sem impacto.
- ✓ A força máxima diminui com o aumento da percentagem de gás e a área de dano aumenta.
- ✓ No caso do ABS o recurso ao fabrico de componentes com a tecnologia MuCell permite aumentar a temperatura máxima de “trabalho” deste material dos 70°C para os 80°C.

5.2. Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, seria interessante repetir os ensaios que não permitiram tirar conclusões, bem como estudar o comportamento deste tipo de materiais à fadiga.

Uma vez que os materiais fabricados com a tecnologia MuCell apresentam melhor capacidade de absorção de energia ao impacto, seria também interessante fazer um

estudo computacional sobre o comportamento de um para-choques fabricado em PP T20 quando sujeito a um impacto (simulando um acidente de viação).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guanghong, H., & Yue, W. (2012). Microcellular foam injection molding process. Em *Some Critical Issues for Injection Molding*, pp. 176-201.
- [2] Materiais Poliméricos. (1998). Em W. F. Smith, *Princípios da ciência e engenharia dos materiais*, pp. 330-370
- [3] Ciminelli, R. R. (1986). Em *Caracterização das propriedades físicas, químicas e estruturais do talco em compostos termoplásticos*, pp. 1-12.
- [4] Azom. (2014). Obtido de <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=829>
- [5] Li, J., Chen, Z., Wang, X., Liu, T., Zhou, Y., & Luo, S. (2013). Cell Morphology and Mechanical Properties os Microcellular MuCell Injection Molded Polyetherimide and Polyetherimide/Fillers Composite Foams. *Journal od Applied Polymer Science*, pp. 4171-4181.
- [6] Hayashi, H., Mori, T., Okamoto, M., Yamasaki, S., & Haymi, H. (2010). Polyethylene ionomer-based nano-composite foams prepared by a batch process and MuCell injection molding, pp. 62-70.
- [7] Bledzki, A. K., Kirschling, H., Steinbichler, G., & Egger, P. (2004). Journal od Cellular Plastics. *Polycarbonate Microfoams with a smooth surface and higher notched impact strenght*, pp. 490-496.
- [8] Xu, J. (2001). Microcellular foam processing in reciprocating-screw injection molding machines. *The Journal of injection molding technology*, pp. 152-159.

- [9] ASTM International. (2010). D638-10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

ANEXO A

Material	Parâmetros Máquina Injeção											Parâmetros MUCell						
	Espessura mm		Injeção			Plastificação			Peso real da peça	Peso da peça	Gás		Tempo de introdução de gás	Esquamento nominal				
	1ª Injeção	2ª Injeção	Vel. Injeção	Dosagem	Passagem	Almofada	Contra-pressão	Velocidade			Tempo Arrefecimento	%			gr	seg.		
PP	2	100	1,0	10	0,5	99	16,7	0,1	0,6	10	75	60	316	300	-	-	-	
PP	2	100	1,0	10	0,5	99	16,7	0,1	0,6	10	75	60	278	270	0,5	8	8	0,61
Pptal	2	100	0,95	66	3	88	20	5	0,1	8	30	60	357	300	-	-	-	
Pptal	2	100	1,78	10	1	66	11	0,5	1,4	8	30	60	306	270	0,5	36	8	0,61
Pptal	2	100	1,78	10	1	66	11	0,5	1,4	8	30	60	300	270	1	30	5	0,96
ABS	2	120	1,49	55	3	88	25	5	5	8	30	60	380	380	-	-	-	
ABS	2	120	0,8	10	0,5	99	15	0,5	0,1	8	30	6	372	350	0,6	22	6,5	0,96
ABS	4	120	1,16	44	5	99	25	3	2	8	30	60	454	455	-	-	-	
ABS	4	160	1,78	10	0,5	99	20	0,5	1	8	40	60	460	410	0,6	50	9	0,97
ABS	4	160	1,78	10	0,5	99	20	0,5	1	8	40	60	450	410	1	40	-	-

ANEXO B

2 J												
ABS 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0	951,20	1,25	1,11	0,02	52,19	0,85	1,01	0,02	47,81	0,85	183,65	0,64
0,6	652,60	2,50	1,34	0,03	62,42	1,12	0,81	0,02	37,58	1,12	138,65	2,41
1	609,08	0,62	1,48	0,03	68,98	1,51	0,66	0,03	31,02	1,51	111,21	2,81
ABS 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0	1205,04	6,87	0,91	0,02	44,89	0,54	1,12	0,00	55,11	0,54	406,90	11,91
0,6	1180,67	5,41	0,86	0,03	42,38	1,62	1,18	0,03	57,62	1,62	420,02	2,30
1	1102,59	51,02	0,94	0,02	45,77	0,98	1,11	0,02	54,23	0,98	373,72	33,01
PP 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0	751,51	0,62	1,28	0,05	58,70	1,70	0,90	0,03	41,30	1,70	119,39	0,74
0,5	700,49	14,58	1,29	0,02	59,32	0,88	0,89	0,02	40,68	0,88	103,13	2,68
1	630,94	10,00	1,44	0,10	65,86	4,40	0,75	0,10	34,14	4,40	87,01	0,52
PP 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,5	820,85	12,49	1,08	0,07	51,76	3,35	1,00	0,07	48,24	3,35	249,97	4,03
PPTL 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0	709,86	4,373	1,38	0,048	64,17	2,206	0,77	0,047	35,83	2,206	118,00	0,259
0,5	652,39	3,540	1,49	0,008	68,70	0,430	0,68	0,010	31,30	0,430	97,14	0,591
1	656,14	1,041	1,50	0,010	68,91	0,485	0,68	0,011	31,09	0,485	96,71	0,053
PPTL 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0	903,52	1,04	1,16	0,01	56,23	0,29	0,90	0,01	43,77	0,29	257,17	1,06
0,5	826,89	4,58	1,25	0,03	59,95	1,31	0,83	0,03	40,05	1,31	217,79	1,76
1	667,8	25,61	1,54	0,02	73,09	0,75	0,57	0,01	26,91	0,75	153,69	17,82

4 J												
ABS 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,0	1341,43	21,55	2,90	0,06	69,89	1,59	1,25	0,07	30,11	1,59	205,68	4,88
1,0	732,77	49,35	3,25	0,04	76,62	9,17	0,99	0,00	23,38	0,17	107,01	1,84
ABS 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,0	1659,189	28,74	2,46	0,04	60,10	0,58	1,63	0,01	39,90	0,58	390,44	24,32
0,6	1329,97	15,20	2,23	0,00	54,19	0,18	1,88	0,02	45,81	0,18	286,94	11,00
1,0	1383,91	12,91	2,18	0,00	53,51	0,03	1,89	0,00	46,49	0,03	318,44	4,99
PP 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,0	1007,63	1,46	2,47	0,00	69,18	0,10	1,30	0,00	30,82	0,10	125,79	0,30
0,5	931,4198	15,62	3,39	0,03	80,45	0,73	0,83	0,03	19,55	0,73	112,34	2,44
PP 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,5	707,15	11,24	2,47	0,05	58,94	1,23	1,72	0,05	41,06	1,23	91,91	2,94
PPTL 2mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,0	939,96	1,67	3,27	0,05	77,25	0,58	0,96	0,02	22,75	0,58	116,67	1,66
0,5	852,71	15,20	3,43	0,14	80,42	2,81	0,83	0,11	19,58	2,81	96,78	1,41
1,0	847,29	20,20	3,49	0,08	81,89	2,41	0,77	0,11	18,11	2,41	96,19	1,89
PPTL 4mm												
%N2	F máx	Desv. P.	E absorvida	Desv. P.	E abs [%]	Desv. P.	E resituída	Desv. P.	E rest [%]	Desv. P.	Rigidez	Desv. P.
0,0	1254,18	2,29	2,69	0,04	65,10	0,61	1,44	0,02	34,90	0,61	240,79	1,92
0,5	1118,62	7,08	2,76	0,04	66,95	0,95	1,36	0,04	33,05	0,95	196,74	1,75
1	945,37	19,6	3,15	0,15	75,38	2,93	1,03	0,12	24,62	2,93	136,44	5,75