



Martinho Lopo de Albuquerque Nuncio Pereira Coutinho

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Mitigação de impactos com estruturas auxéticas impressas em 3-D.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: Mestre Hugo Rebelo, Bolseiro de Doutoramento,
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Válder J. G. Lúcio,
Professor Associado, FCT-UNL

Arguente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu,
Professor Associado, FCT-UNL

Vogais: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2019

Copyright © Martinho Lopo de Albuquerque Núncio Pereira Coutinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Ao meu avô, que me ensinou o que é ser-se Engenheiro.

Por isso, e por tudo o resto, muito obrigado.

Agradecimentos

A realização desta dissertação teve o apoio de várias pessoas, sem as quais não teria sido possível. Assim, neste espaço dedicado a tal, expresso a minha sincera gratidão para com todas elas.

Em primeiro lugar, cabe-me agradecer ao Professor Doutor Filipe Santos por ter-me orientado ao longo deste percurso, e essencialmente por me ter inspirado a estudar conceitos distintos da engenharia.

É igualmente indispensável o agradecimento ao co-orientador Mestre Hugo Rebelo, que foi incansável no apoio prestado, disponibilizando o seu conhecimento e o seu tempo todas as vezes que foram necessárias.

Um agradecimento especial para o Sr. Leigh Sutherland, do Instituto Superior Técnico, que realizou os ensaios físicos, assim como ao CCPI (Centro de Competências para a Protecção de Infraestruturas) por disponibilizar uma câmara de alta velocidade, e à 1Sar Silva pelo apoio prestado.

De igual forma, ao Eng. Vitor Silva, do DEC da FCT-UNL, pela ajuda prestada nos ensaios de tração.

Aos docentes do DEC, que contribuíram para a minha formação em engenharia, e tantas bases me deram para um sucesso profissional futuro.

De igual forma, aos meus colegas que me acompanharam todos estes anos, com um grande apoio mútuo e solidariedade, para que todos conseguissem atingir os objectivos propostos.

Quero ainda mencionar a ajuda prestada pela Bruna e pela Joana, por disponibilizarem o seu tempo e talento para este fim.

Por último, resta-me um agradecimento especial à Francisca, que sempre me motivou e incentivou ao trabalho, dando igualmente um grande apoio emocional necessário em alguns momentos críticos deste percurso.

Resumo

Os elementos estruturais de uma dada construção, estando sujeitos a efeitos inesperados de degradação (impactos), podem ver a sua função estrutural comprometida. A temática da protecção destes elementos tem vindo a ser cada vez mais estudada, de modo a procurar o aumento da durabilidade e segurança das estruturas. A presente dissertação estuda a utilização de painéis contendo estruturas celulares, que permitam mitigar os efeitos desses impactos.

Foram estudadas diversas geometrias celulares distintas, tendo como base trabalhos desenvolvidos por outros autores. Estas geometrias foram ensaiadas fisicamente e numericamente através de ensaios quasi-estáticos e de impactos de baixa velocidade. As amostras para ensaio foram fabricadas através de impressão 3-D, utilizando PLA (ácido poliláctico) e PETG (politereftalato de etileno com glicol). Entre as estruturas celulares estudadas, destacaram-se as estruturas auxéticas.

Uma estrutura auxética possui uma geometria reentrante que lhe confere um coeficiente de Poisson negativo. Essa característica significa que, ao contrário da quase totalidade das outras estruturas, esta estreita ao ser comprimida, e alarga ao ser tracionada.

Embora todas as geometrias ensaiadas tenham apresentado absorção e dissipação de energia, observaram-se algumas diferenças interessantes entre elas. As estruturas auxéticas apresentaram uma maior capacidade de absorver grandes deformações, assim como de distribuir a energia absorvida por uma área bastante maior. Por seu lado, as hexagonais apresentaram uma maior rigidez, e consequentemente uma maior dissipação de energia por plastificação.

Palavras-chave: Auxético, PLA, PETG, Metamateriais mecânicos, Impressão 3-D, Dissipação de energia.

Abstract

The structural elements of any given construction, being vulnerable to suffering unexpected degradation effects (impacts), can have their structural function compromised. Studies of the protection of these elements have increased lately, seeking a higher structural durability and security. This dissertation studies the usage of panels composed by auxetic structures, able to mitigate the effects caused by impacts.

Different cellular geometries were studied, based on the work developed by other authors. These geometries were subject to numerical and physical tests, through quasi-static and low velocity impacts. The tested specimens were obtained with the 3-D printing technology, using PLA (polylactic acid) and PETG (Polyethylene terephthalate with glycol). Amongst the studied cellular geometries, the auxetics showed very good results.

Auxetic structures possess a re-entrant geometry that offers a negative Poisson's ratio. That characteristic means that, contrarily to almost all other structures, they get narrower when compressed, and wider when pulled.

Although all tested structures presented some energy absorption and dissipation, some interesting differences between them were observed. The auxetic structures presented a higher deformation capacity, allied with a wider absorbed energy distribution throughout a bigger area. On the other hand, non-auxetic structures presented a higher rigidity, resulting in a higher energy dissipation through rupture of the cells.

Key words: Auxetic, PLA, PETG, Mechanical metamaterials, 3-D printing, Energy dissipation.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do trabalho	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Metamateriais mecânicos	3
2.1.1 Definição e caracterização	3
2.1.2 Aplicações e exemplos	4
2.2 Coeficiente de Poisson negativo	5
2.2.1 Definição e caracterização	5
2.2.2 Materiais auxéticos	7
2.2.3 Estruturas e mecanismos auxéticos	8
2.2.4 Aplicações	11
2.2.5 Limitações	13
2.3 Introdução à impressão em 3-D	13
3 Desenvolvimento dos painéis “sandwich” celulares	15
3.1 Definição das geometrias	15
3.1.1 Introdução	15
3.1.2 Optimização da geometria auxética	16
3.1.3 Homogeneização das estruturas	18
3.1.4 Estrutura definida para impressão 3-D	20
3.2 Impressão 3-D	21

3.2.1	Aparelhos utilizados neste trabalho	21
3.2.2	Método de obtenção dos provetes 3-D	22
3.2.3	Materiais utilizados.....	23
3.2.4	Resultado final	24
4	<i>Ensaaios experimentais</i>	27
4.1	Caracterização dos ensaios	27
4.1.1	Configuração dos ensaios realizados	27
4.1.2	Ensaaios quasi-estáticos (QS)	29
4.1.3	Ensaaios de impacto de baixa velocidade	30
4.2	Resultados obtidos	31
4.2.1	Análise visual dos provetes ensaiados.....	31
4.2.2	Ensaaios quasi-estáticos	34
4.2.3	Ensaaios de impacto	39
4.2.4	Balanço energético	43
4.2.5	Coeficiente de Poisson.....	46
4.3	Ensaaios de tração	47
4.4	Conclusões	49
5	<i>Modelação numérica no software LS-DYNA</i>	51
5.1	Introdução ao software LS-DYNA	51
5.2	Características da modelação numérica	51
5.2.1	Definição das malhas de elementos finitos	51
5.2.2	Materiais utilizados.....	55
5.2.3	Configurações do <i>keyword</i>	56
5.3	Resultados obtidos	58
5.3.1	Validação do modelo numérico definido.....	58
5.3.2	Mecanismos de dissipação de energia	62
5.3.3	Análise do comportamento dos provetes	66
5.3.4	Comparação das geometrias	70
5.3.5	Comparação dos materiais	72
5.3.6	Coeficiente de Poisson.....	74
5.4	Conclusões	75
6	<i>Conclusões e desenvolvimentos futuros</i>	77
6.1	Conclusões:	77

6.2	Desenvolvimentos futuros:.....	77
	<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>81</i>

Índice de figuras

Figura 2.1 – Exemplo da estrutura de um metamaterial mecânico	4
Figura 2.2 - Painel de alumínio com geometria hexagonal.....	4
Figura 2.3 – Estrutura auxética	5
Figura 2.4 - Deformação de uma dada estrutura, sujeita a forças de tração.....	5
Figura 2.5 - Resistência ao impacto de um material não-auxético (a), e de um material auxético (b) ...	7
Figura 2.6 – Deformação não-auxética (a) e deformação auxética (b)	8
Figura 2.7 - Exemplo de uma célula de uma estrutura auxética quiral	9
Figura 2.8 – Exemplos de estruturas celulares auxéticas em estrela.....	9
Figura 2.9 - Comportamento auxético de uma estrutura celular reentrante ao ser tracionada	9
Figura 2.10 - Estrutura 3D auxética	10
Figura 2.11 – Célula reentrante 3D	10
Figura 2.12 – Exemplos de estruturas auxéticas compostas por sólidos.....	11
Figura 2.13 – Curvatura anticlástica de uma estrutura não-auxética (a); Curvatura sinclástica de uma estrutura auxética (b).....	12
Figura 2.14 - Esquema de deformação de vasos sanguíneos artificiais convencionais (a) e auxéticos (b).....	12
Figura 2.15 – (a) Processo de impressão 3-D por extrusão (FDM), e (b) impressão de um provete auxético em PLA.	14
Figura 3.1 – Variações de geometria numa célula hexagonal (a), rectangular (b) e auxética (c).	15
Figura 3.2 - Geometria de uma célula auxética.....	16
Figura 3.3 - Gráfico de comparação da força de impacto de geometrias auxéticas com diferentes ângulos internos.....	17
Figura 3.4 - Célula auxética escolhida	17
Figura 3.5 - Deformação elástica máxima de uma célula auxética.....	18
Figura 3.6 - Disposição da espessura do painel "sandwich"	18
Figura 3.7 - Estrutura celular com geometria auxética.	19
Figura 3.8 - Dimensões gerais dos provetes a imprimir (cm).	20
Figura 3.9 - Dimensão x das duas geometrias escolhidas para impressão.	21
Figura 3.10 - Impressora Prusa MK2 utilizada.	21
Figura 3.11 - Software PrusaSlicer utilizado.	22
Figura 3.12 - Pormenor de diferenças de impressão entre os dois materiais.	25
Figura 4.1 – (a) Prensa utilizada para os ensaios QS e (b) máquina de impactos de baixa velocidade utilizada para os restantes ensaios.	28
Figura 4.2 - Câmara de alta velocidade utilizada.	29

Figura 4.3 - Destruição causada por ensaios quasi-estáticos em dois provetes de geometria distinta. .32	32
Figura 4.4 - Pormenor do dano causado na parte inferior de um provete, sujeito a um ensaio QS.32	32
Figura 4.5 - Danos sofridos por dois provetes com as mesmas características, da 1ª série (esquerda) e da 2ª série (direita).....33	33
Figura 4.6 - Rotura total de um provete ocorrida por erro de impressão.34	34
Figura 4.7 - Valores de força e energia obtidos através dos ensaios QS, nos 4 provetes ensaiados.35	35
Figura 4.8 – Comparações, em função do deslocamento, da força e energia dos 4 ensaios QS realizados.....35	35
Figura 4.9 - Aparecimento da primeira rotura de uma célula num provete auxético em PLA, sujeito ao ensaio QS.36	36
Figura 4.10 - Máxima deformação obtida antes do final do ensaio QS, num provete auxético em PLA.37	37
Figura 4.11 – Máxima penetração ocorrida no ensaio QS de um provete hexagonal em PLA.38	38
Figura 4.12 - Dano causado pelo ensaio QS no provete hexagonal em PLA.38	38
Figura 4.13 - Comparação da força actuante sobre cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.39	39
Figura 4.14 - Distintos momentos dos ensaios experimentais de impacto realizados em provetes de PLA, com uma energia de impacto superior a 20 J, definidos na figura anterior.40	40
Figura 4.15 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.41	41
Figura 4.16 - Comparação da força actuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio experimental.42	42
Figura 4.17 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada material ao longo do tempo do ensaio experimental.....43	43
Figura 4.18 – Gráficos de força-deslocamento dos ensaios de impacto realizados.44	44
Figura 4.19 - Comparação da energia absorvida na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.....45	45
Figura 4.20 - Método de determinação dos deslocamentos vertical e horizontal, no software PFV. ...47	47
Figura 4.21 – Metodologia de ensaio utilizada e resultado final dos provetes em PETG, após os ensaios.48	48
Figura 4.22 - Gráficos de tensão-extensão resultantes dos ensaios de tração realizados.....49	49
Figura 4.23 - Comparação dos valores das tensões dos dois materiais ensaiados.49	49
Figura 5.1 - Força de impacto para diferentes refinamentos de malha da geometria auxética.52	52
Figura 5.2 - Malha definida para a geometria auxética (esquerda) e pormenor das 4 filas de elementos que compõem cada face da geometria hexagonal (direita).52	52
Figura 5.3 - Disposição das duas placas (esquerda) e dispersão da malha definida (direita).53	53
Figura 5.4 - Pormenores da escolha da malha para as placas superior e inferior.....53	53

Figura 5.5 - Vista inferior do apoio utilizado.....	54
Figura 5.6 - Impactor utilizado para os ensaios numéricos.....	54
Figura 5.7 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete auxético em PLA.	59
Figura 5.8 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete auxético em PETG.	60
Figura 5.9 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete hexagonal em PLA.	61
Figura 5.10 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete hexagonal em PETG.	62
Figura 5.11 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria hexagonal.....	64
Figura 5.12 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria rectangular. ...	65
Figura 5.13 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria auxética.....	66
Figura 5.14 - Comportamento do provete auxético em PLA ao ser sujeito ao ensaio da 1ª série.....	66
Figura 5.15 - Pormenores da plastificação da placa superior e da geometria subjacente de um provete de geometria auxética, em PLA.	67
Figura 5.16 - Comportamento do provete hexagonal em PLA ao ser sujeito ao ensaio da 1ª série.....	67
Figura 5.17 - Pormenores da plastificação da placa superior e da geometria subjacente de um provete de geometria hexagonal, em PLA.	68
Figura 5.18 – Tensão de Von Mises num provete auxético [Pa].	69
Figura 5.19 - Tensão de Von Mises num provete hexagonal [Pa].	69
Figura 5.20 - Comparação da força actuante sobre cada geometria ao longo do tempo do ensaio numérico.....	70
Figura 5.21 - Distintos momentos dos ensaios numéricos de impacto realizados em provetes de PLA na 1ª série, definidos na figura anterior.	71
Figura 5.22 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio numérico.....	72
Figura 5.23 - Comparação da força actuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio numérico.....	73
Figura 5.24 – Comparação do deslocamento vertical de cada material ao longo do tempo do ensaio numérico.....	74

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Coeficiente de Poisson de alguns materiais comuns.....	6
Tabela 3.1 - Determinação das espessuras a utilizar para cada uma das geometrias	19
Tabela 3.2 - Parâmetros inseridos no software de impressão, para cada material.	23
Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados	23
Tabela 3.4 - Características dos provetes.....	24
Tabela 4.1 - Ordem e características de cada ensaio realizado	31
Tabela 4.2 – Valores limite da rotura plástica para os 4 provetes distintos.	36
Tabela 4.3 – Balanço energético de cada ensaio de impacto realizado.....	45
Tabela 4.4 - Valores do coeficiente de Poisson de cada geometria distinta, obtidos experimentalmente.	47
Tabela 4.5 - Características dos provetes ensaiados à tração.....	48
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.	56
Tabela 5.2 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria hexagonal.	63
Tabela 5.3 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria rectangular.	64
Tabela 5.4 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria auxética.	65
Tabela 5.5 - Valores do coeficiente de Poisson de cada geometria distinta, obtidos numericamente e experimentalmente.	75



1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

Actualmente, a necessidade de poupança, tanto a nível de recursos como económica, está presente em todos os aspectos da engenharia. Isto leva à procura de elementos estruturais com maior durabilidade, aliada à segurança dos mesmos. Estes elementos podem estar sujeitos não só aos fenómenos de degradação comuns, mas também a impactos inesperados provenientes de várias origens distintas, tais como fenómenos naturais, acidentes, origens criminosas ou mesmo terroristas. Esta dissertação foca-se na procura de uma solução económica que permita reduzir os danos impostos aos elementos estruturais sujeitos a tais problemas, protegendo-os exteriormente.

O desenvolvimento da tecnologia de impressão em 3-D tem potenciado o estudo de metamateriais mecânicos, pois permite fabricar rapidamente protótipos de diferentes geometrias e de massa reduzida (Jiang, Li, 2018). Estes metamateriais caracterizam-se por obterem as características mecânicas principalmente através da sua geometria, ao invés de ser pelas características do seu material. Dentro desta família de materiais, os auxéticos são dos mais interessantes, devido à sua capacidade de deformação e absorção de energia.

Um material auxético caracteriza-se por possuir um coeficiente de Poisson negativo. Este coeficiente traduz o comportamento transversal de um material, ao ser comprimido ou tracionado longitudinalmente. Sendo negativo, a secção transversal diminui com o aumento da compressão, e aumenta com o da tração. Tal comportamento permite obter características mecânicas superiores, tais como a resistência ao impacto, absorção de energia e deformação, entre outros (Evans, Alderson, 2000).

Assim, utilizando geometrias celulares e otimizando-as, é possível criar um painel “sandwich” que ofereça uma protecção exterior adequada face a vários tipos de acções dinâmicas, tais como o impacto de projecteis e explosões.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um painel do tipo “sandwich”, impresso em 3-D, com uma geometria celular. Os painéis serão impressos em dois materiais distintos e poderão ser colocados à face de elementos estruturais, de modo a protegê-los de impactos externos inesperados.

Será estudada sobretudo a optimização de uma geometria auxética, de modo a que esta consiga mitigar uma grande parte da energia induzida na estrutura, quando solicitada por um impacto. Esta estrutura será comparada com outras estruturas celulares, mas com coeficiente de Poisson positivo (rectangulares e hexagonais). Procura-se caracterizar as propriedades mecânicas de cada estrutura, tais como a resistência ao impacto, a deformação e a dissipação de energia.

Será igualmente comparado o comportamento dos dois materiais de impressão distintos, de modo a perceber qual o mais vantajoso para este tipo de acções.

Estes painéis poderão ter várias aplicações de protecção possíveis, tais como em elementos estruturais, embarcações ou veículos militares, por exemplo. Terão igualmente a função de protecção contra explosões, não apenas pelos impactos consequentes de projecteis, mas igualmente das ondas de pressão provenientes das mesmas.

1.3 Estrutura do trabalho

Após esta pequena introdução do trabalho, será apresentado o enquadramento actual deste tipo de pesquisa, assim como uma revisão dos conhecimentos necessários para compreender a temática em estudo. Numa segunda fase, será apresentada a metodologia de desenvolvimento dos painéis que irão ser posteriormente ensaiados. Será abordada igualmente a forma de obtenção dos provetes: a impressão em 3-D.

Serão apresentados os ensaios físicos realizados para testar o comportamento das estruturas impressas, de diferentes geometrias e materiais. Estes serão expostos no capítulo 4, assim como todas as suas características.

O capítulo 5 cinge-se à análise numérica, realizada no software LS-DYNA. Esta baseia-se na simulação computacional dos ensaios apresentados no capítulo anterior, e tem como objectivo aprofundar o estudo das estruturas, obtendo dados concretos dos esforços internos a que se encontram sujeitas.

Por fim, serão apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho, assim como algumas possibilidades de desenvolvimentos futuros com base nesta temática. Assim, a estrutura do trabalho toma a seguinte forma:

- 1- Introdução
- 2- Estado da arte
- 3- Desenvolvimento dos painéis “sandwich” celulares
- 4- Ensaio experimentais
- 5- Análise numérica no software LS-DYNA
- 6- Conclusões e desenvolvimentos futuros

2 Estado da Arte



Este capítulo pretende expor a temática em estudo nesta dissertação. Apresenta igualmente o trabalho de outros autores que tem sido realizado sobre este assunto, e que serviu de base para que o mesmo fosse desenvolvido.

2.1 Metamateriais mecânicos

2.1.1 Definição e caracterização

O conceito de metamaterial foi primeiramente introduzido no campo da Electromagnética. “Meta” provém do grego, significando “além” ou “para além de”, e é empregue nesta situação para caracterizar as características superiores deste tipo de material, comparando-o a um material convencional (Ren, Das, Tran, Ngo, Xie, 2018).

Um material comum obtém as suas propriedades através dos elementos químicos que o compõem, assim como das ligações entre os mesmos. De modo distinto, um metamaterial obtém essas mesmas propriedades através da disposição física das diferentes estruturas específicas que o compõem. Estas estruturas funcionam como os átomos ou moléculas de um material comum, e com recurso a interações com ondas electromagnéticas, estas podem apresentar características superiores fora do alcance dos convencionais. Estas características podem traduzir uma melhoria de vários aspectos do comportamento, tais como o magnetismo, a acústica, o índice de refração, entre outros (Liu, Zhang, 2010).

Os metamateriais mecânicos constituem uma derivação destes vistos acima. Ao contrário dos anteriores, são compostos por materiais convencionais. Obtêm então o seu estatuto de superioridade mecânica através da sua geometria macroscópica interna. Esta geometria faz com que as características físicas da estrutura se tornem bastante superiores (mais interessantes) às do material pelo qual é composta.

A evolução da tecnologia de impressão em 3-D proporcionou um aumento exponencial dos estudos realizados sobre esta classe de materiais, visto ser bastante fácil e rápido produzir protótipos com as geometrias desejadas, quando comparada com tecnologias tradicionais de fabrico. As características físicas consideradas no âmbito desta dissertação são o aumento da sua resistência ao impacto e

dissipação de energia, assim como a possibilidade de formar estruturas com coeficiente de Poisson negativo. Estas características serão estudadas extensivamente ao longo desta dissertação.

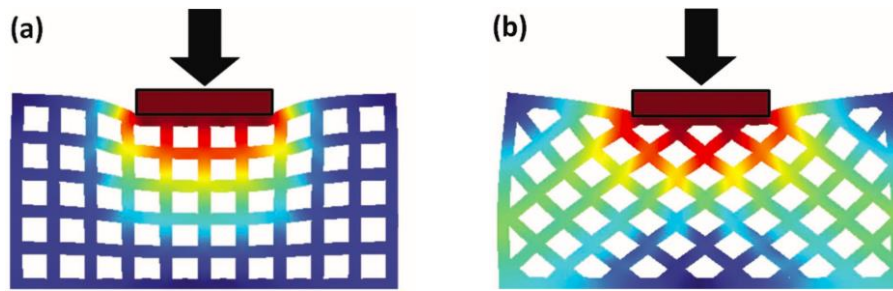


Figura 2.1 – Exemplo da estrutura de um metamaterial mecânico (Lee, Singer, Thomas, 2012)

A Figura 2.1 apresenta uma peça estruturalmente anisotrópica, carregada verticalmente, vista de dois planos distintos. Observa-se que, para o mesmo deslocamento vertical devido a um carregamento, a distribuição interna de tensões é notavelmente diferente, apenas devido à sua anisotropia. Torna-se assim possível ajustar a geometria interna da estrutura de modo a controlar os locais que mais sofrem com as tensões impostas, ou proteger algum elemento interno que careça de tal cuidado.

2.1.2 Aplicações e exemplos

As aplicações mais interessantes para esta tecnologia são as estruturas de elevada porosidade. Estas beneficiam dessa mesma característica para se deformarem, contraírem ou expandirem, consoante a sua finalidade. Esta característica é procurada quando o objectivo é a absorção de impactos, procurando uma dissipação de energia o mais eficaz possível.

A geometria hexagonal, ou em favo de mel (Figura 2.2), é das mais utilizadas devido à sua maior simplicidade. Permite uma dissipação eficaz de energia, devido à sua porosidade. Possui igualmente uma baixa densidade, assim como um baixo peso, devido à grande quantidade de vazios presentes.

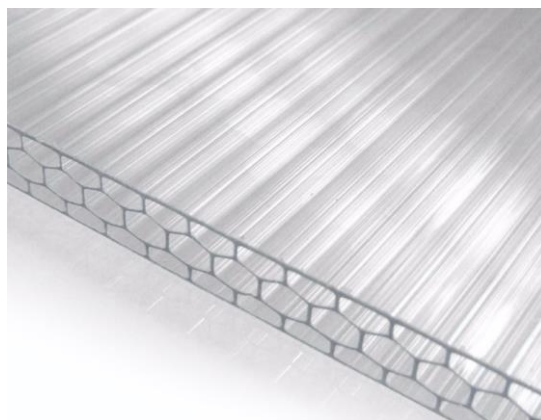


Figura 2.2 - Painel de alumínio com geometria hexagonal

A Figura 2.3 retrata um outro exemplo que possui uma geometria menos convencional. Esta geometria permite uma grande deformação em regime elástico (cerca de metade da altura) quando comprimida, regressando ao seu estado inicial após descarga.

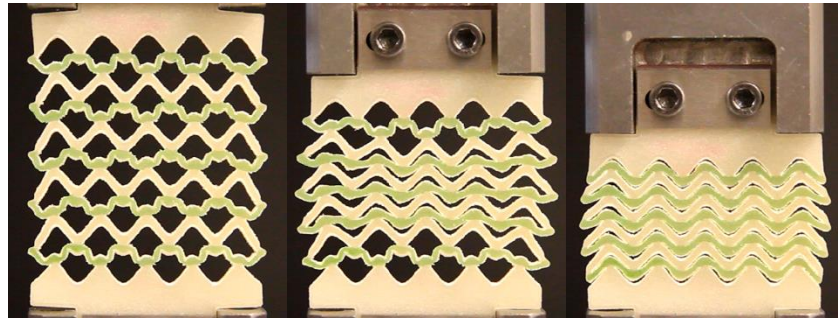


Figura 2.3 – Estrutura auxética (Rafsanjani, Akbarzadeh, Pasini, 2015)

2.2 Coeficiente de Poisson negativo

2.2.1 Definição e caracterização

O comportamento elástico dos materiais é, entre outros, caracterizado pela sua distorção (G), elasticidade (E), compressibilidade (K) e coeficiente de Poisson (ν) (Yang, Li, Shi, Xie, & Yang, 2004). Este último, traduz o comportamento transversal de um material, ao ser solicitado longitudinalmente, e é expresso da seguinte forma, esquematizada na Figura 2.4:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.1)$$

Em que:

ν : Coeficiente de Poisson.

ε_x : Deformação na direcção transversal x .

ε_y : Deformação na direcção transversal y .

ε_z : Deformação na direcção longitudinal z .

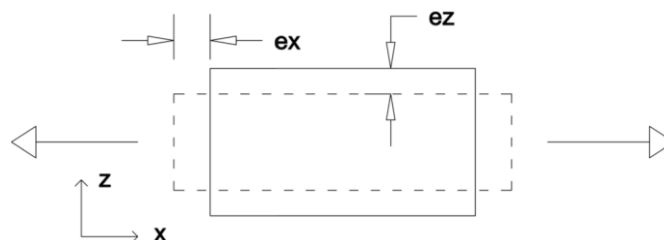


Figura 2.4 - Deformação de uma dada estrutura, sujeita a forças de tração.

Apesar de a maioria dos materiais possuir o coeficiente de Poisson positivo, este pode tomar valores contidos no intervalo entre -1 e $+0,5$ (Liu, Q., 2006). Apresentam-se seguidamente alguns valores de coeficiente de Poisson, para materiais comuns:

Tabela 2.1 - Coeficiente de Poisson de alguns materiais comuns (Magalhães, 2015).

Material	Coeficiente de Poisson
Borrachas	0,48 a 0,5
Alumínio	0,32 a 0,35
Aço	0,26 a 0,29
Cortiça	0

Para o caso de materiais isotrópicos (possuem as mesmas características físicas em todas as direcções), existem relações de dependência para as quatro constantes indicadas anteriormente (Yang, Li, Shi, Xie, & Yang, 2004).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.3)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2.4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{3K - 2G}{3K + G} \right) \quad (2.5)$$

O módulo de distorção (G) é uma das características que se altera com o coeficiente de Poisson. Partindo das expressões (2.2) e (2.4), é possível obter uma expressão para G que seja inversamente proporcional a $(1+\nu)$.

$$G = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (2.6)$$

À medida que ν se aproxima do seu valor mínimo (-1), o factor $(1+\nu)$ tende a anular-se. Assim, observa-se que o módulo de distorção (G) se torna infinitamente grande, tornando-se consequentemente bastante superior ao de um material tradicional com $\nu > 0$ (Evans, Alderson, 2000).

Similarmente, a resistência ao impacto (H) é inversamente proporcional a $(1-\nu^2)$ (Evans, Alderson, 2000), da seguinte forma, para uma distribuição uniforme de pressão:

$$H = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (2.7)$$

Deste modo, H tende igualmente para um valor infinito com a aproximação de ν a -1 . Ao analisar a resistência máxima ao impacto de um material com um ν positivo, mantendo E constante, determina-se que esta ocorre quando $\nu = +1/2$, sendo $(1 + \nu^2) = 3/4$. Este valor é igualmente obtido para $\nu = -1/2$. Conclui-se assim que, de modo a exponenciar o aumento da resistência ao impacto, o coeficiente de Poisson deverá ser calibrado de modo a pertencer ao intervalo $-1 \leq \nu < -1/2$ (Evans & Alderson, 2000).

A Figura 2.5 apresenta uma comparação do comportamento do material subjacente ao impacto, para um material auxético e um não-auxético. O aumento da resistência ao impacto do auxético explica-se pela concentração do material no local do impacto (b).



Figura 2.5 - Resistência ao impacto de um material não-auxético (a), e de um material auxético (b) (Evans & Alderson, 2000).

2.2.2 Materiais auxéticos

Lakes, em 1987, descobriu uma espuma de poliuretano (PU), composta por estruturas reentrantes que apresentava este comportamento, possuindo um coeficiente de Poisson igual a $-0,7$ (Lakes, R., 1987). Mais tarde, em 1991, este tipo de estruturas foi baptizado de auxético, por Evans. Este termo provém do Grego *auxetos*, que significa “aquele que pode ser aumentado” (Evans et al, 1991). O termo “*anti-rubber*” (anti-borracha) foi igualmente utilizado. As borrachas possuem um $\nu = +1/2$, e podem ser caracterizadas como incompressíveis (Liu, Q., 2006). Considera-se então que este comportamento é antagónico ao dos auxéticos, visto que estes materiais possuem alta compressibilidade, aliada a uma muito pequena probabilidade de rotura por esforços de corte.

O comportamento auxético de um material, comparado com um não-auxético, sujeito a uma deformação por tração, evidencia-se na Figura 2.6:

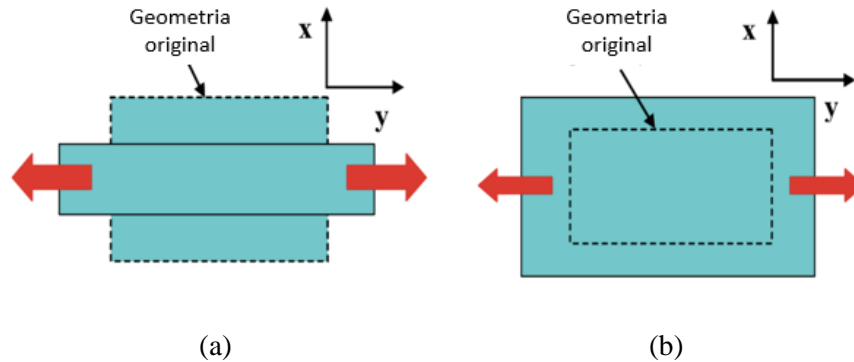


Figura 2.6 – Deformação não-auxética (a) e deformação auxética (b) (adaptado de: Liu, Q., 2006).

Embora o início do estudo de materiais com coeficiente de Poisson negativo tenha ocorrido com Lakes, em 1987, a possibilidade de existência dos mesmos já haveria sido aceite há mais de 150 anos, sendo consequência da teoria clássica da elasticidade (Love, 1944). Após Lakes, numerosos estudos foram realizados sobre esta temática. Descobriu-se a existência de vários materiais auxéticos presentes na natureza, que apresentam esta característica em pelo menos um plano de deformação. A maioria destes são moleculares, embora igualmente se tenha observado esta característica em biomateriais, tais como a pele de gato (Evans & Alderson, 2000).

2.2.3 Estruturas e mecanismos auxéticos

2.2.3.1 Estruturas celulares

As estruturas celulares auxéticas são um exemplo perfeito de metamateriais mecânicos que, como visto anteriormente, tiram partido da sua geometria para obter as características mecânicas pretendidas. Existe uma vasta gama de exemplos de estruturas celulares auxéticas, sendo que as principais são as seguintes:

- Estruturas quirais:

Estas estruturas, apresentadas na Figura 2.7, evidenciam um comportamento auxético quando comprimidas ou tracionadas, devido ao enrolamento ou desenrolamento das ligações acopladas aos nós cilíndricos. Este desenrolamento, associado à rotação dos nós, causa o aumento de volume das células, e conseqüente aumento de secção transversal (Alderson, 2007). Prall e Lakes, em 1997, obtiveram um coeficiente de Poisson igual a -1 , para estruturas quirais em 2D. Tal significa que a deformação transversal foi equivalente à longitudinal. Embora este seja o comportamento auxético ideal, a transformação destas estruturas de duas para três dimensões traduz grandes problemas ao nível das fixações das ligações aos nós, ainda não tendo sido aperfeiçoadas por nenhum autor. Este facto tem como consequência a pouca utilização desta solução.

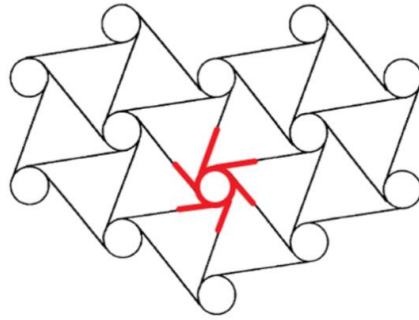


Figura 2.7 - Exemplo de uma célula de uma estrutura auxética quiral (Ren, Das, Tran, Ngo and Xie, 2018).

– Estruturas em estrela

As estruturas em estrela podem apresentar várias geometrias distintas. A Figura 2.8 apresenta duas delas. Estas são igualmente difíceis de transpor para a terceira dimensão, devido às grandes mudanças no valor dos ângulos das estrelas. Só um material extremamente maleável aguentaria tal deformação sem sofrer danos.

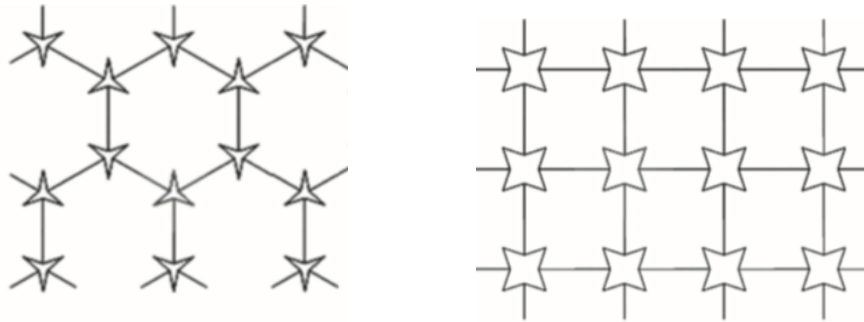


Figura 2.8 – Exemplos de estruturas celulares auxéticas em estrela (Ren, Das, Tran, Ngo and Xie, 2018).

– Estruturas reentrantes

O caso das estruturas hexagonais reentrantes é aquele que, consensualmente, melhor traduz o comportamento auxético em duas e três dimensões (Figura 2.9). A variação de valores dos seus ângulos internos produz uma variação no coeficiente de Poisson, sendo que este poderá aproximar-se de $-0,7$.

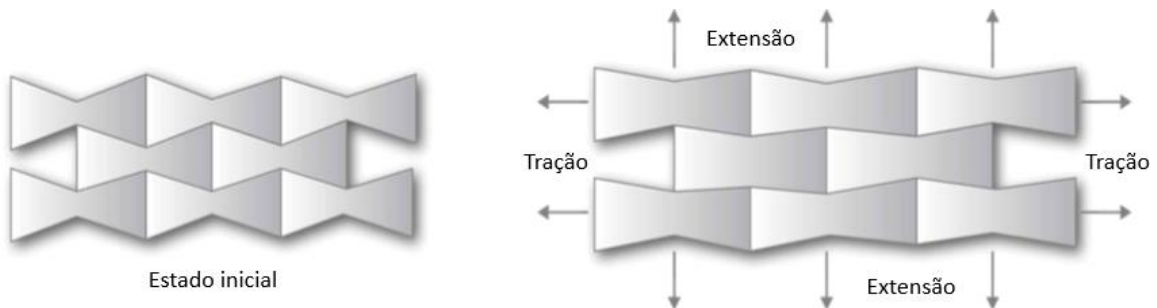


Figura 2.9 - Comportamento auxético de uma estrutura celular reentrante ao ser tracionada (adaptado de: Underhill, 2014).

A sua grande vantagem em relação às referidas anteriormente prende-se no facto de que os seus nós não são sujeitos a grandes deformações, sendo capazes de as absorver em fase elástica. Assim, é de fácil transformação em 3-D pois o material aguenta, elasticamente, os deslocamentos celulares sofridos. Para este caso, o comportamento auxético apenas se manifesta numa das direcções, pelo que este facto tem que ser tomado em atenção aquando da disposição das células.

Transferindo essa estrutura celular para a terceira dimensão, é possível obter uma estrutura similar à apresentada seguidamente, na Figura 2.10:

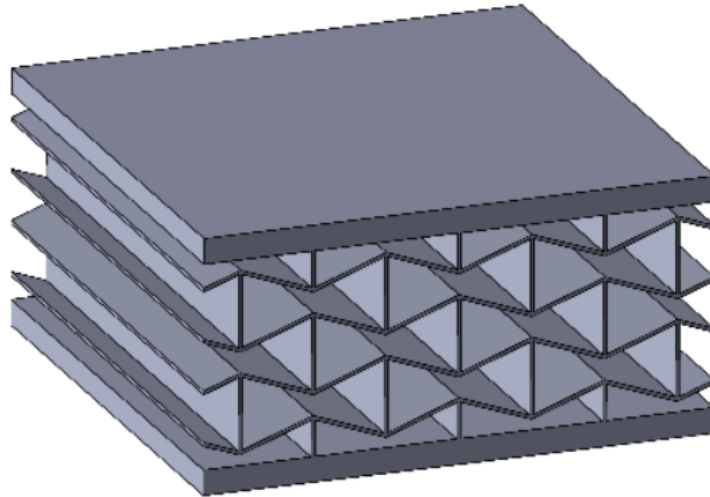


Figura 2.10 - Estrutura 3D auxética (Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, Hermenean, 2018).

É igualmente possível idealizar uma estrutura que evidencie comportamento auxético em todas as direcções. A Figura 2.11 apresenta uma célula 3D reentrante, que poderia formar uma estrutura com tal efeito, e que apresentaria melhores resultados que a vista anteriormente. Todavia, a complexidade que esta estrutura apresenta faz com que seja pouco estudada.



Figura 2.11 – Célula reentrante 3D (Ren, Das, Tran, Ngo and Xie, 2018).

2.2.3.2 Estruturas compostas por sólidos

A característica principal destas estruturas é o facto de obterem o seu comportamento auxético através de mudanças na disposição espacial dos seus componentes, e apresentarem comportamento auxético apenas quando tracionadas, como pode ser observado na Figura 2.12. Visto serem compostas por sólidos que, por definição, não sofrem alterações de geometria, necessitam de rótulas nos seus vértices que permitam rotações no plano. Em termos práticos, estas rótulas fazem com que seja bastante difícil fechar completamente a estrutura, pois ocupam espaço entre sólidos e colidem quando esta se encontra no estado mais comprimido. São, portanto, de uso limitado (Stavric, Wiltsche, 2019).

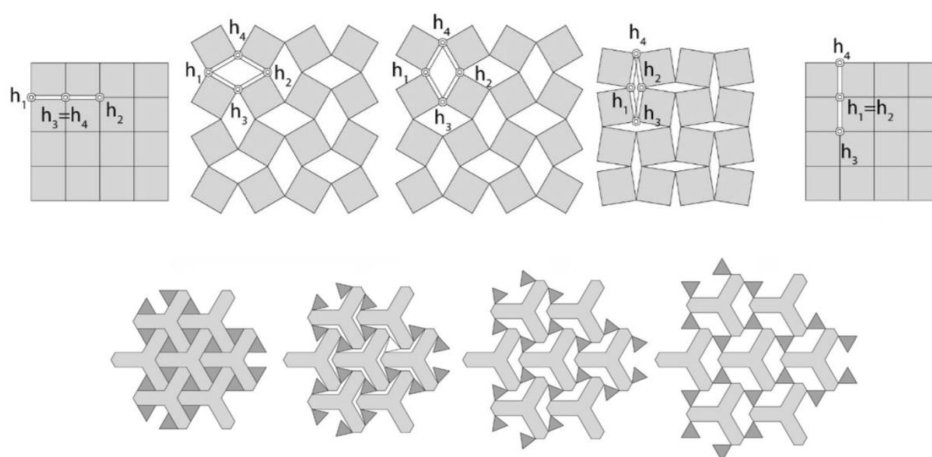


Figura 2.12 – Exemplos de estruturas auxéticas compostas por sólidos (Stavric, Wiltsche, 2019).

2.2.4 Aplicações

Actualmente, existe já um número significativo de aplicações reais para estruturas auxéticas. Grandes marcas automóveis, como a Toyota, utilizam esta tecnologia pela sua característica superior de absorção de energia, em aplicações de mitigação de impactos na estrutura dos seus automóveis (Liu, Q., 2006).

Um outro fenómeno que torna as estruturas auxéticas tão interessantes é observável na Figura 2.13. As estruturas em laje, ao sofrerem um impacto, sofrem compressão das fibras presentes no lado do impacto, e tracção das fibras do lado oposto. Numa estrutura não-auxética, isto traduz-se num alongamento longitudinal, associado a um encurtamento transversal devido ao seu coeficiente de Poisson positivo. Este comportamento denomina-se de anticlástico (Figura 2.13 (a)). Contrariamente, uma estrutura auxética permite uma deformação convexa sinclástica, sem a deformação vista anteriormente (Figura 2.13 (b)), devida a um alongamento tanto transversal como longitudinal das fibras do lado oposto ao impacto. Essa sinclasia e deformação convexa tornam a sua aplicação muito mais interessante para automóveis, aeronaves, ou mesmo para vestuário militar à prova de bala (Burke, 1997; McMullan, 2004).

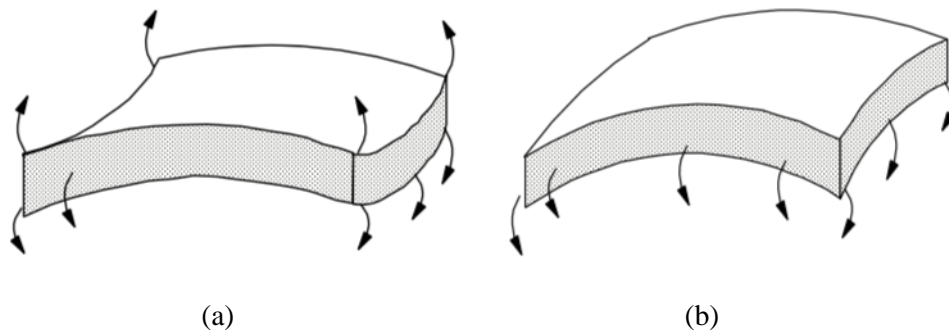


Figura 2.13 – Curvatura anticlástica de uma estrutura não-auxética (a); Curvatura sinclástica de uma estrutura auxética (b) (Liu, Q., 2006).

Uma outra aplicação já existente para esta tecnologia é a de sistemas inteligentes de filtragem. São produzidas estruturas porosas compostas por células reentrantes, com dimensões inferiores a 1mm. Estas estruturas são activas, sendo controlado o tamanho dos poros através de acções de compressão ou tracção. Tal permite ajustar o filtro ao tamanho desejado, tornando-o bastante mais polivalente.

Existem igualmente aplicações para estruturas auxéticas no campo da biomedicina. Exemplo disso são os vasos sanguíneos artificiais. Estes sofrem uma diminuição de espessura das paredes, associada ao aumento de volume devido à pressão arterial (Figura 2.14). A diminuição da espessura aumenta o risco de perfuração do vaso, traduzindo efeitos catastróficos. Caso sejam utilizadas estruturas auxéticas no fabrico desses mesmos vasos, o efeito da espessura das paredes é oposto, aumentando com o volume e com a pressão. Assim, os vasos artificiais tornam-se mais seguros e duráveis.

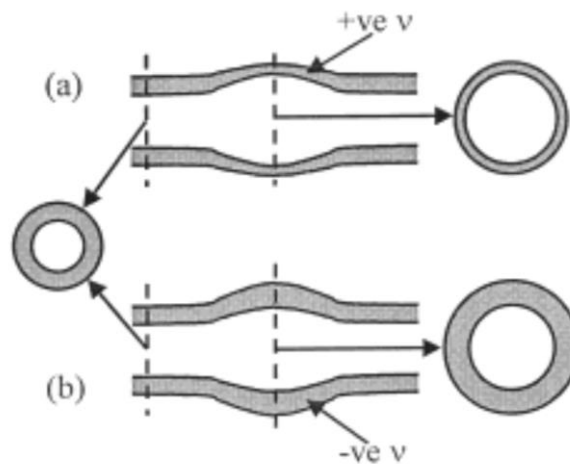


Figura 2.14 - Esquema de deformação de vasos sanguíneos artificiais convencionais (a) e auxéticos (b) (Evans & Alderson, 2000).

Procurando tirar partido das suas características de dissipação de energia e absorção de impacto, estruturas auxéticas de grande escala são igualmente estudadas para separadores de auto-estradas, autódromos, protecção para cargas descarregadas de pára-quedas, e muitos outros fins similares.

2.2.5 Limitações

A maioria das estruturas auxéticas, embora apresentem um bom comportamento em duas dimensões, não são facilmente desenvolvidas na terceira. Esse facto deve-se às elevadas deformações que estas sofrem ao serem solicitadas, reduzindo as suas possibilidades de aplicação em casos práticos.

As estruturas celulares, como visto anteriormente, só possuem um coeficiente de Poisson negativo devido à sua geometria. Necessitam de espaço para que as mudanças geométricas ocorram. Assim, possuem uma elevada porosidade, e conseqüente baixa densidade, comparada com o material que as compõe. Tal traz limitações relativas às suas capacidades estruturais, visto que, geralmente, não possuem rigidez suficiente para aguentar cargas (Liu, Q., 2006).

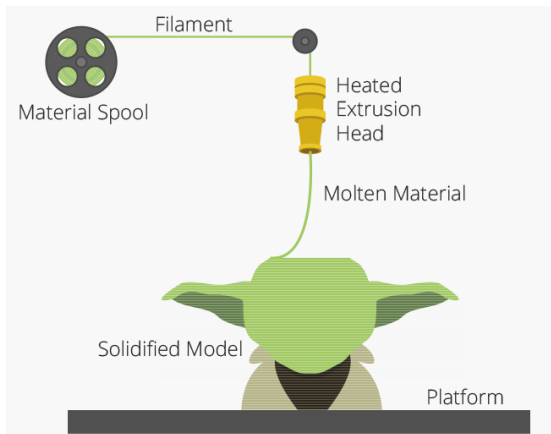
2.3 Introdução à impressão em 3-D

A tecnologia de impressão 3-D foi primeiramente introduzida por Charles Hull, em 1986. Foi desenvolvida de modo a poder ser possível construir variados protótipos de forma mais rápida, eficiente e barata. Foi nesse ano de 1986 que foi desenvolvida por Hull a primeira impressora, que funcionava por estereolitografia (SLA). Este método de impressão (SLA) assenta num processo de fotopolimerização: um laser ultravioleta incide sobre uma resina (fotopolímero) líquida que solidifica pela acção do calor imposto pelo mesmo. A resina está contida dentro de um reservatório com uma plataforma, inicialmente colocada à superfície, e que vai descendo, camada a camada, à medida que a geometria pretendida solidifica, servindo de base para esta.

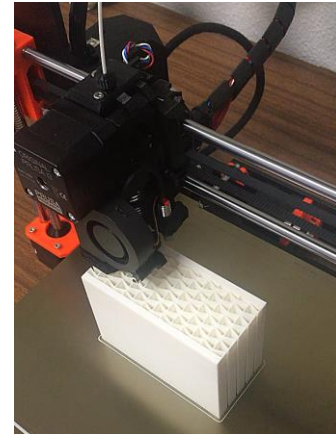
Após a comercialização das primeiras impressoras deste tipo, apareceram outras soluções, tais como:

- Fabrico de Objectos através de Laminação (*Laminated Object Manufacturing*): recorte e colagem de camadas laminares de material através de um laser
- Fusão por Feixe de Eletrões (*Electron Beam Additive Manufacturing*): utiliza um feixe de eletrões como fonte de energia para soldar material, em vácuo
- Sintetização Selectiva (*Selective Laser Sintering*): um laser de alta potência é utilizado para fundir pequenas partículas (pó) de diversos materiais, solidificando-o.

Mais tarde, apareceu o método que é o mais usado presentemente, e que permitiu a venda em massa de impressoras 3-D a particulares: o método de Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modelling*), mais conhecido como método de extrusão, apresentado na Figura 2.15. Consiste no aquecimento do filamento através de uma cabeça de extrusão, derretendo-o e tornando-o maleável. Esta movimenta-se nas três direcções e deposita-o no seu local, linha a linha, cada uma ligando-se à inferior ao solidificar.



(a)



(b)

Figura 2.15 – (a) Processo de impressão 3-D por extrusão (FDM) (3D Printing Industry, “The free beginner’s guide”), e (b) impressão de um provete auxético em PLA.

Este método de impressão tornou possível a prototipagem relativamente rápida (quando comparado com os métodos descritos anteriormente) de pequenas peças a qualquer pessoa, sem ser necessário recorrer a máquinas dispendiosas de grandes dimensões. Assim, passou a ser possível efectuar impressões rápidas e económicas, utilizando materiais leves e maleáveis (plásticos) para fabricar peças de infinitas configurações geométricas.

3 Desenvolvimento dos painéis “sandwich” celulares

Neste capítulo, será abordado o método de concepção e de escolha das estruturas celulares impressas para a realização dos ensaios. São tidos em conta variados aspectos, tais como as dimensões gerais, as diferentes geometrias internas e o coeficiente de Poisson.

3.1 Definição das geometrias

3.1.1 Introdução

Um dos principais pontos de interesse na comparação de geometrias reside na possibilidade de estas serem bastante similares, sendo que a variação entre elas reside no ângulo interno escolhido. Com um igual número de arestas, através da afinação desse mesmo ângulo, são criadas as três geometrias distintas em estudo: hexagonal, rectangular e auxética (Figura 3.1).

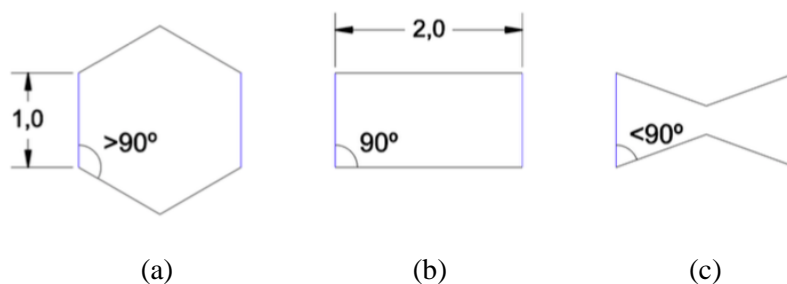


Figura 3.1 – Variações de geometria numa célula hexagonal (a), rectangular (b) e auxética (c).

Esta foi uma das bases de comparação escolhida neste trabalho, sendo que a outra foi possuírem todas uma massa equivalente. Partindo destes pressupostos, foi então necessário dimensionar as células hexagonais e auxéticas. De modo a simplificar e a tornar este trabalho comparável com outros similares já realizados relativos a impactos sobre células hexagonais, determinou-se que estas são regulares, tendo todos os ângulos internos iguais a 120°.

Tornou-se então apenas necessário o dimensionamento de células auxéticas que apresentem as melhores características possíveis.

3.1.2 Optimização da geometria auxética

Pretende-se que a geometria escolhida possua as melhores características possíveis no que toca a absorção e dissipação de energia. Para tal, como visto anteriormente, procura-se obter um coeficiente de Poisson mínimo.

Esta temática foi já anteriormente estudada (Imbalzano, Linforth, Ngo, Lee e Tran, 2017). Estes autores demonstram os efeitos de alguns parâmetros geométricos, evidenciados na Figura 3.2, no coeficiente de Poisson, tais como o ângulo interno, e a relação entre a aresta $L1$ e o espaço entre as arestas reentrantes, $L2$. A esta última, denominam de “ rl ”, sendo o quociente entre o $L2$ e o $L1$.

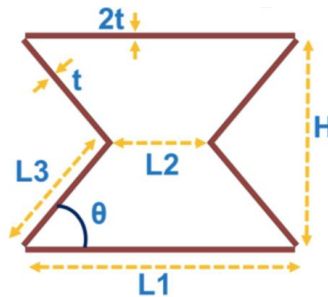


Figura 3.2 - Geometria de uma célula auxética (Imbalzano, Linforth, Ngo, Lee e Tran, 2017).

Com recurso a simulações numéricas e a análises experimentais, foi-lhes possível obter as seguintes conclusões: o ângulo interno mais favorável para um menor coeficiente de Poisson é igual a 70° , assim como um $rl = 0,3$.

Um estudo similar foi realizado nesta disserta o. Tendo como base as características geométricas descritas acima (arestas de igual tamanho), foi realizada uma comparação de geometrias com diferentes ângulos internos: 50° , 60° , 70° e 80° . Estas células, embora possuam ângulos internos distintos, cumprem todas a relação óptima de $\frac{L2}{L1} = 0,3$. Foram sujeitas a ensaios numéricos de impacto, através do software LS-DYNA. Todas as características destes ensaios encontram-se dispostas no capítulo 5 desta disserta o.

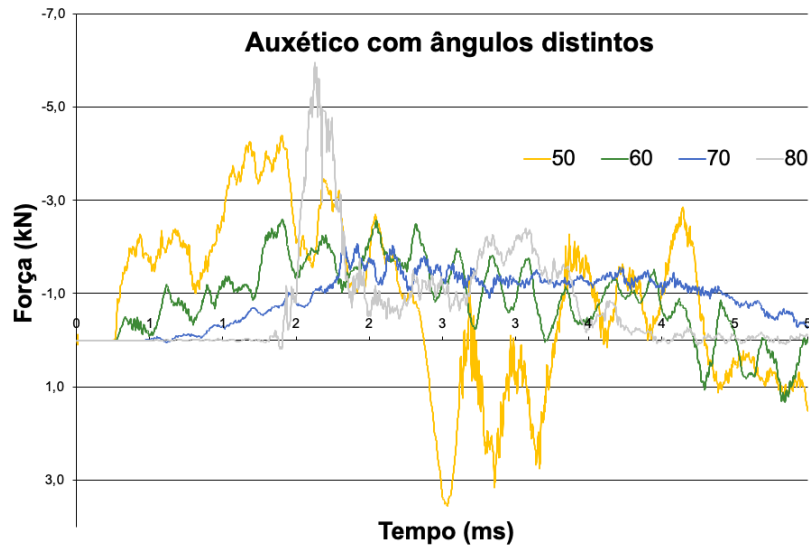


Figura 3.3 - Gráfico de comparação da força de impacto de geometrias auxéticas com diferentes ângulos internos.

O gráfico acima confirma as conclusões obtidas pelos autores referidos anteriormente. Traduz as forças obtidas no local de impacto, nas diferentes geometrias. Observa-se que a geometria com um ângulo interno de 70° apresenta não só uma reação mais baixa, como também um intervalo de tempo significativamente maior até que esta se manifeste. Estes são indicadores claros de uma eficaz dissipação de energia.

Com base em todos os dados referidos, foi escolhida a seguinte célula auxética para dimensionamento da estrutura global (Figura 3.4):

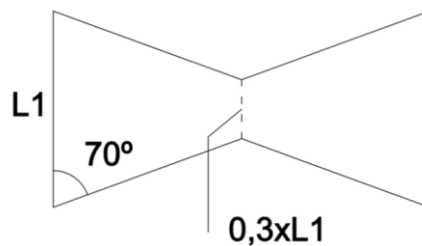


Figura 3.4 - Célula auxética escolhida

A estrutura auxética foi então formada através da ligação de um grande número de células destas. Após escolhida a geometria final, torna-se possível a determinação do coeficiente de Poisson teórico, na Figura 3.5. Este possui o seu máximo, em meio elástico, quando a deformação é máxima, com $L2 = 0$. Com base na fórmula (2.1), obtém-se um coeficiente de Poisson teórico igual a $-0,49$.

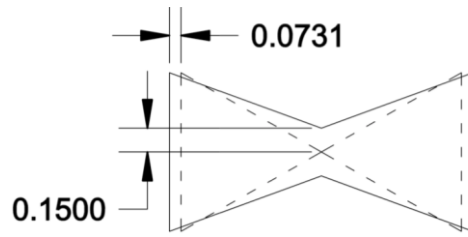


Figura 3.5 - Deformação elástica máxima de uma célula auxética.

3.1.3 Homogeneização das estruturas

O objectivo da realização dos ensaios físicos é comparar a resposta das diferentes estruturas face ao impacto. Assim, foi necessário desenvolver estruturas com características comparáveis de dimensão e massa, de modo a obter resultados satisfatórios.

Após definida a geometria das três células distintas, estudou-se a melhor maneira de as incorporar num painel “sandwich”. Definiu-se que o painel teria uma espessura de 5 cm, disposta da seguinte forma, na Figura 3.6:

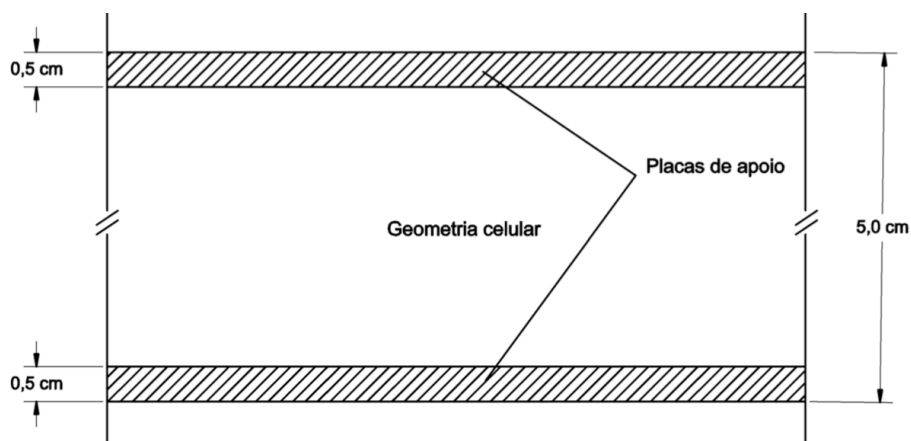


Figura 3.6 - Disposição da espessura do painel "sandwich".

As placas possuem uma espessura de 0,5 cm. A inferior tem como função o apoio e fixação do painel à estrutura a proteger, e a exterior recebe os impactos, permitindo à geometria celular realizar a sua função de absorção de energia. Todos os elementos do painel são constituídos pelo mesmo material.

De modo a obter resultados comparáveis para as três geometrias escolhidas, foi necessário um especial cuidado na definição do tamanho e da espessura das suas células. Um maior número de linhas de células auxéticas, traduz um menor coeficiente de Poisson (Imbalzano, Linforth, Ngo, Lee e Tran, 2017). Definiu-se então uma geometria com 7 linhas de células auxéticas sobrepostas, visto que para um número superior a este, as células tornar-se-iam demasiado pequenas para uma adequada impressão em 3-D.

Deste modo, definiu-se a geometria auxética da seguinte forma (Figura 3.7):

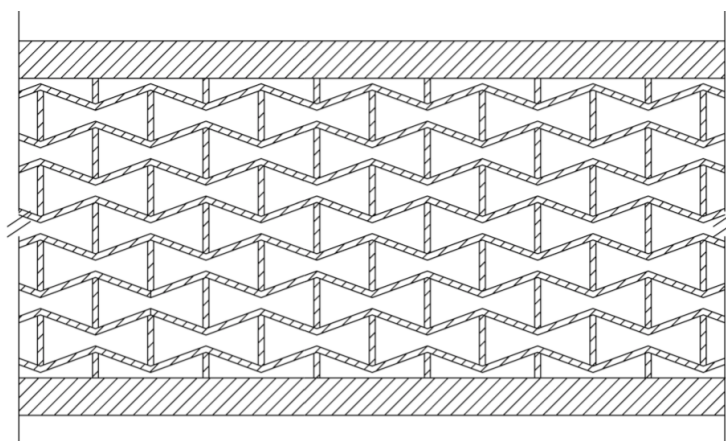


Figura 3.7 - Estrutura celular com geometria auxética.

As outras duas estruturas (hexagonal e rectangular) foram definidas da mesma forma, cumprindo o critério definido anteriormente adoptando arestas de igual dimensão.

Embora todas as estruturas possuam as mesmas dimensões, não possuem a mesma massa. A densidade da estrutura auxética é bastante superior às outras, sendo a rectangular a menos densa. Assim, foi necessário compensar o défice de densidade com um aumento da espessura das paredes das células, de modo a obter uma massa equivalente. Procurou-se, em 2-D, que a área de cheios das distintas geometrias fosse idêntica. Assim, ao passar para a terceira dimensão, será utilizada a mesma quantidade de material para cada uma delas, sendo consequentemente a massa similar para todas.

O facto de estas estruturas virem a ser impressas em 3-D faz com que não seja possível escolher uma qualquer espessura para as paredes, devido ao diâmetro mínimo do filamento. Este facto será aprofundado no capítulo seguinte, e causa limitações na fase de dimensionamento.

Para um qualquer troço de 10 cm de comprimento das estruturas celulares, e excluindo as placas superior e inferior, definimos os seguintes valores, expressos na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Determinação das espessuras a utilizar para cada uma das geometrias

	Auxética	Hexagonal	Rectangular
Área total [cm²]	40,00	40,00	40,00
Espessura das paredes [mm]	0,80	1,00	1,30
Área de cheios [cm²]	10,11	10,00	10,05
Densidade [%]	25,29	25,00	25,13

Consideram-se desprezáveis as diferenças de densidade desta ordem de grandeza (0,3%), pelo que as espessuras consideradas tornam as estruturas equivalentes ao nível da massa.

3.1.4 Estrutura definida para impressão 3-D

Sendo que o objectivo principal desta dissertação foi o de comparar uma estrutura auxética com uma não auxética, decidiu-se imprimir apenas uma não auxética, escolhendo-se a hexagonal. Esta decisão baseou-se no facto das duas (hexagonal e rectangular) possuírem comportamento similar, como foi visto na literatura e comprovado através dos ensaios numéricos realizados. Assim sendo, não se considerou compensatório o gasto de tempo e material de impressão necessários para imprimir as três geometrias, tendo sido realizados, portanto, ensaios físicos em estruturas auxéticas e hexagonais.

As estruturas projectadas anteriormente podem possuir um variadas dimensões na direcção x e y , sendo os 5 cm na direcção z a única limitação. De modo a imprimir uma amostra de cada uma para ensaio, foram determinadas as dimensões ideais para um provete, apresentado na Figura 3.8. Estas são de $10 \times 10 \times 5$ cm.

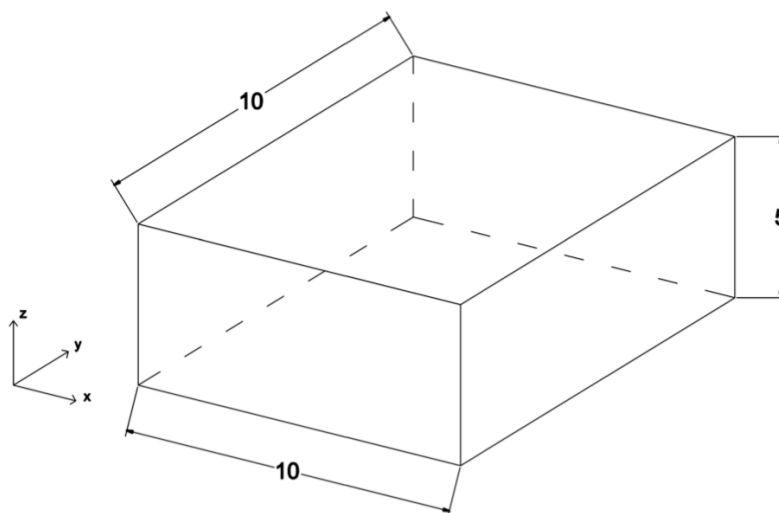


Figura 3.8 - Dimensões gerais dos provetes a imprimir (cm).

Enquanto que, na direcção y , os 10 cm são iguais para as duas geometrias, o mesmo não acontece na direcção x . Esta última foi ajustada a cada uma, de modo a evitar o corte a meio de uma coluna de células. Caso esse facto se verificasse, essa coluna tornar-se-ia insignificante para a resistência da peça, contribuindo apenas como desperdício de material. Assim, o comprimento final das duas peças na direcção x , apresentado na Figura 3.9, é o seguinte:

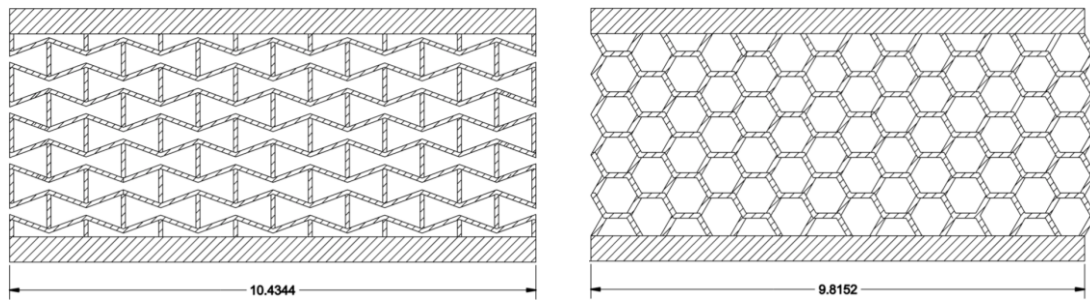


Figura 3.9 - Dimensão x das duas geometrias escolhidas para impressão.

Transformando estas geometrias em provetes 3-D, apresentam as seguintes dimensões:

- Auxético: $10,43 \times 10 \times 5$ [cm]
- Hexagonal: $9,82 \times 10 \times 5$ [cm]

3.2 Impressão 3-D

3.2.1 Aparelhos utilizados neste trabalho

O processo de impressão propriamente dito foi levado a cabo por duas impressoras distintas. Este facto deveu-se ao elevado tempo de impressão de cada provete (cerca de 30 horas), e ao grande número de provetes a imprimir. Assim, foram utilizadas duas impressoras Prusa 3D: a MK2 e a MK3 (Figura 3.10). Embora sejam modelos distintos, o facto de serem da mesma marca torna-as bastante similares. Teve-se em especial atenção a configuração de impressão, de modo a que fosse em tudo igual para as duas, resultando em provetes idênticos, como era pretendido.

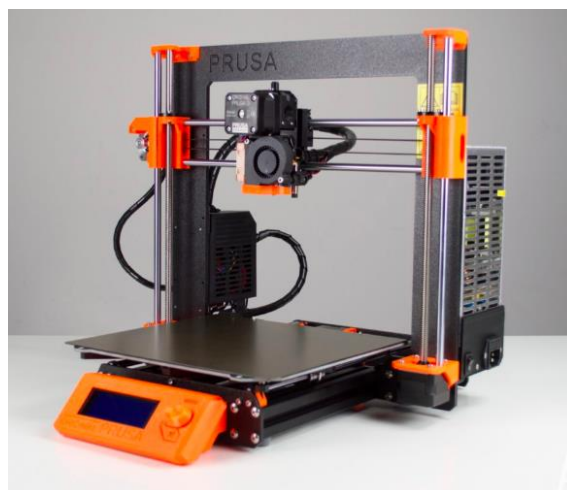


Figura 3.10 - Impressora Prusa MK2 utilizada.

3.2.2 Método de obtenção dos provetes 3-D

- Modelação inicial:

O primeiro passo necessário para obter um provete impresso em 3-D é a modelação do mesmo num programa de projeto assistido por computador (CAD). Para esse efeito, foi utilizado o programa AutoCAD, desenvolvido pela Autodesk. As geometrias foram primeiramente desenhadas em duas dimensões, tendo em atenção a espessura e todas as especificações referidas acima, incluindo as placas superior e inferior (Figura 3.9). Seguidamente, utilizando o comando “*extrude*”, foram transformadas em geometrias de três dimensões, sendo que a dimensão fora do plano (y) possui um comprimento fixo de 10 cm.

- Exportação dos ficheiros em formato STL:

A sigla STL provém da palavra estereolitografia, que como visto anteriormente, foi a primeira técnica de impressão 3-D desenvolvida. Um ficheiro deste formato traduz uma simplificação do ficheiro CAD original. Utiliza polígonos de diversos tamanhos que se ajustam à geometria em causa, fazendo com que apenas possua informações sobre as características geométricas, não possuindo quaisquer dados sobre o processo de obtenção dessa mesma geometria.

Torna-se então possível, através deste ficheiro STL, importar a geometria para um programa que a transforme num formato reconhecível pela impressora, e que lhe confira todas as especificações necessárias para que esta a consiga imprimir da forma desejada.

- PrusaSlicer:

O software PrusaSlicer pertence à empresa Prusa 3D, a fabricante das impressoras utilizadas. É através dele que se definem todas as características de impressão.

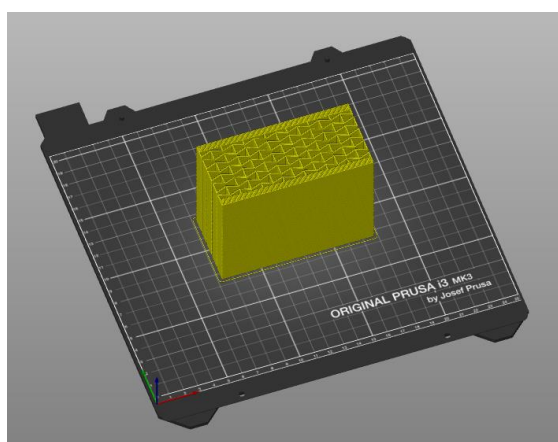


Figura 3.11 - Software PrusaSlicer utilizado.

Como foi referido acima, os parâmetros definidos foram os mesmos para as duas impressoras. Foram igualmente os mesmos para as duas geometrias distintas, de modo a que fossem o mais

comparáveis possível. No entanto, foi necessário adaptar dois dos parâmetros ao material de impressão: a temperatura da mesa, e a temperatura do extrusor (Tabela 3.2). Os dois materiais distintos, possuindo diferentes características, possuem necessidades diferentes nesse aspecto. Tal facto foi tido em consideração aquando da configuração das características de impressão.

Tabela 3.2 - Parâmetros inseridos no software de impressão, para cada material.

	PLA	PETG
Altura das camadas [mm]	0,2	0,2
Temperatura da mesa [°C]	60	90
Temperatura do extrusor [°C]	210	250
Diâmetro do extrusor [mm]	0,4	0,4
Velocidade de impressão [mm/s]	30	30

3.2.3 Materiais utilizados

Para além das duas geometrias em análise, o segundo objectivo de comparação desta dissertação assenta no material de impressão utilizado. Tradicionalmente, o PLA (plástico de poliácido láctico) é o material mais utilizado para estes fins. Assim, foi escolhido para ser comparado com um menos comum: o PETG.

Este polímero resulta da combinação de PET (politereftalato de etileno) com Glicol. O PET é dos plásticos mais utilizados do mundo, sendo o composto das garrafas de água, por exemplo. Embora seja vastamente utilizado para vários fins, as características do PET não são favoráveis ao seu aquecimento para extrusão. Foi precisamente para colmatar essa lacuna que foi combinado com Glicol, formando o PETG.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados (Prusa Material Techsheet).

	PLA	PETG
Massa volúmica [kg/m³]	1250	1290
Módulo de Young [GPa]	2,4	1,5
Coefficiente de Poisson	0,33	0,33
Limite de elasticidade [MPa]	73	58

A Tabela 3.3 apresenta as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados. Nos dois casos, foram utilizadas bobines de filamento com 1,75 mm de diâmetro.

3.2.4 Resultado final

Foram impressos, no total, 12 provetes, com as características referenciadas na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 - Características dos provetes.

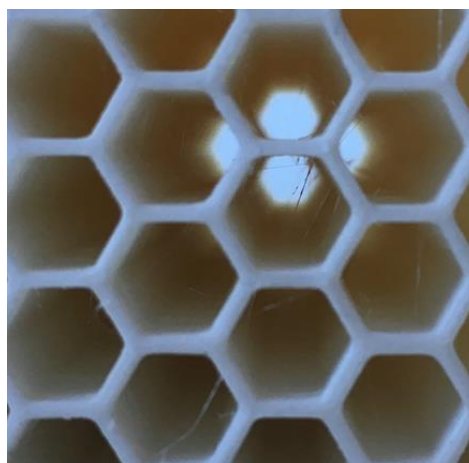
	Massa do provete [g]	Espessura das paredes [mm]	Número de provetes
Auxético em PLA	248	0,80	3
Auxético em PETG	256	0,85	3
Hexagonal em PLA	225	1,00	3
Hexagonal em PETG	230	1,05	3

Ocorreram, esporadicamente, erros e dificuldades de impressão. Em alguns casos, os erros foram notórios e inviabilizaram a impressão, obrigando-a a ser retomada do início. No entanto, um dos provetes evidenciou um erro de impressão na fase dos ensaios experimentais. Esse erro não foi detectado anteriormente, e poderá ter sido causado por uma falha de abastecimento elétrico à impressora. Tal provete, ao ser ensaiado, sofreu uma quebra total, anulando os resultados pretendidos. Este caso será exposto no capítulo dos ensaios experimentais.

Uma diferença clara de impressão entre os dois materiais, encontra-se ilustrada na Figura 3.12. O PLA proporciona uma impressão limpa, praticamente sem filamentos soltos. Pelo contrário, o PETG provoca algum desperdício de material, ficando o provete cheio de filamentos no meio das geometrias. Para o caso estudado, estes filamentos não causam qualquer problema a nível de resistência, sendo apenas desagradáveis a nível estético.



PETG



PLA

Figura 3.12 - Pormenor de diferenças de impressão entre os dois materiais.

4 Ensaios experimentais

4

A componente prática desta dissertação baseou-se em ensaios experimentais realizados com os 12 provetes impressos. O objectivo destes ensaios foi o de obter uma comparação real entre as duas geometrias, assim como entre os dois materiais, ao serem sujeitos a solicitações equivalentes.

4.1 Caracterização dos ensaios

De modo a testar os provetes impressos das duas geometrias e dos dois materiais distintos, foram realizados ensaios quasi-estáticos (4 provetes) e de impactos de baixa velocidade (8 provetes).

4.1.1 Configuração dos ensaios realizados

4.1.1.1 Máquinas de ensaios utilizadas

Os ensaios propostos foram realizados em duas máquinas distintas, ambas presentes no departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Lisboa. Os ensaios quasi-estáticos foram realizados numa prensa Instron 1343 Universal (Figura 4.1 (a)), que possui uma capacidade de carga de 250 kN, e uma célula de carga integrada com uma precisão de 0,01 kN.

Por sua vez, os ensaios de impacto foram realizados através da máquina de impactos de baixa velocidade Rosand IFW5 Instrumented (Figura 4.1 (b)). Este aparelho permite obter registos sobre a velocidade de impacto, assim como a força exercida pelo impactor na superfície de contacto.



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Prensa utilizada para os ensaios QS e (b) máquina de impactos de baixa velocidade utilizada para os restantes ensaios.

4.1.1.2 *Impactor*

Foi utilizado um impactor hemisférico, de aço, com 30 mm de diâmetro. Este foi escolhido em detrimento dos de ponta plana, por se considerar ser mais ajustado a possíveis condições de impacto reais.

4.1.1.3 *Condições de apoio*

O apoio presente para a realização dos ensaios era bastante simples, restringindo apenas deslocamentos verticais, sendo que os provetes assentavam livremente sobre ele, sem qualquer tipo de fixação. A área de contacto com o provete era cilíndrica e oca, sendo o diâmetro maior igual a 8 cm, e o menor igual a 4 cm. Este apoio, possuindo uma área central vazada, garante que o impactor nunca entra em contacto com a sua superfície de aço, mesmo que o provete sofra uma destruição total. Esse contacto, a existir, poderia causar graves danos ao aparelho.

Teria, no entanto, sido mais interessante um apoio que oferecesse igualmente restrições ao movimento nas direcções x e y . Este facto tornaria a comparação mais fiável, pois garantiria a ocorrência do impacto sempre no mesmo ponto do provete.

4.1.1.4 Câmera de alta velocidade

De modo a registar as deformações impostas pelos ensaios nas geometrias, foi utilizada uma câmara de alta velocidade Photron Fastcam Mini Ax, apresentada na Figura 4.2. Este aparelho foi calibrado para capturar 10 000 frames por segundo, obtendo com grande pormenor todos os momentos do impacto e da respectiva resposta da estrutura.

A câmara, sempre que ligada, encontra-se a registar imagens. Estas apenas são guardadas na sua memória quando tal é solicitado pelo operador. Esta solicitação foi efectuada manualmente através de um gatilho, que era pressionado aquando da queda do impactor. Embora, para cada ensaio, o instante de pressão do gatilho seja distinto, tal não compromete os resultados pois foi utilizado um *trigger* do tipo “centro”, que guarda na memória da câmara o número de frames correspondentes a cerca de um segundo antes, e um segundo após o disparo do gatilho. Foram definidos igualmente outros parâmetros, tais como a *Shutter Speed* (corresponde ao tempo em que o diafragma se encontra aberto, e promove a nitidez da imagem), com um valor de 1/40 000 segundos, e uma resolução de 768×528. Assim, foi possível obter todas as imagens pretendidas.



Figura 4.2 - Câmara de alta velocidade utilizada.

4.1.2 Ensaios quasi-estáticos (QS)

Foram realizados ensaios quasi-estáticos em 4 provetes, sendo um de cada combinação de geometria e material. Estes foram feitos com o mesmo impactor utilizado para os ensaios de

impacto, mas com uma velocidade de penetração de cerca de 9 mm/min. Efectuaram-se em primeiro lugar, antes dos de impacto, de modo a ganhar sensibilidade sobre o que seria de esperar nos ensaios seguintes, e que energias de impacto se deveriam utilizar. Através destes ensaios, é possível obter resultados detalhados acerca do comportamento geral das estruturas, tais como o seu limite elástico, plástico, o seu deslocamento em função da força aplicada, etc... No entanto, estes testes eliminam os efeitos das forças de inércia dependentes da aceleração, ou possíveis efeitos de amortecimento que possam existir e ser relevantes para a caracterização dos provetes.

4.1.3 Ensaios de impacto de baixa velocidade

Os ensaios de impacto de baixa velocidade têm como objectivo avaliar o comportamento de uma determinada peça, quando solicitada a um impacto. Designa-se de baixa velocidade quando se trata de um objecto em queda por acção da gravidade, ou com acelerações impostas pouco significativas. No caso de se tratar de um projectil disparado por uma arma ou uma explosão, por exemplo, classificar-se-ia como impacto de alta velocidade.

Os ensaios foram realizados através da queda do impactor de massa conhecida (4,853 kg), e variando a altura de modo a ajustar a energia de impacto (J). Esta última foi o parâmetro fixo de comparação, podendo ser determinada da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (4.1)$$

Sendo m a massa que se encontra em queda (kg), v a velocidade no instante de impacto (m/s) e h a altura de queda do impactor (m).

A velocidade de queda é determinada através da passagem de uma chapa metálica, incorporada ao peso em queda, por um sensor óptico. Torna-se então possível, tendo como base a velocidade, a força e o tempo, obter os valores de deslocamento do impactor, assim como da energia absorvida, através da integração dos valores obtidos.

Os ensaios foram divididos em duas rondas, cada uma com uma energia de impacto distinta, como pode ser observado na Tabela 4.1. A primeira energia escolhida foi de 20 J. Esta foi determinada tendo como base os ensaios quasi-estáticos já realizados, pois procurou-se definir uma energia que causasse dano, mas que não resultasse numa grande destruição do provete. Foram então ensaiados 4 provetes (1 de cada combinação geometria/material) nesta primeira ronda, restando outros 4 idênticos para a segunda. Inicialmente, pretendia-se realizar a segunda ronda de ensaios com uma energia superior, entre os 30 e os 40 J. Ao efectuar a primeira ronda, concluiu-se que o material apresentava um comportamento mais frágil que o esperado, sofrendo mais dano. Assim,

foi definida para a segunda ronda uma energia menor, igual a 10 J, de modo a tentar observar um comportamento mais elástico da geometria.

Tabela 4.1 - Ordem e características de cada ensaio realizado

	Ordem de ensaio	Características do provete	Altura de queda [m]	Velocidade de impacto [m/s]	Energia de impacto [J]
1 ^a Série	1	Hexagonal - PETG	0,46	3,01	22,00
	2	Hexagonal - PLA	0,46	3,01	22,00
	3	Auxetico - PETG	0,47	3,04	22,40
	4	Auxetico - PLA	0,44	2,95	21,05
2 ^a Série	5	Hexagonal - PETG	0,24	2,18	11,49
	6	Hexagonal - PLA	0,23	2,10	10,72
	7	Auxetico - PETG	0,21	2,04	10,08
	8	Auxetico - PLA	0,23	2,12	10,85

Não sendo possível calibrar a energia de impacto desejada no aparelho, sendo esta calculada através da fórmula (4.1), observam-se pequenas variações na mesma. Estes erros ocorrem pela dificuldade de tornar constante a altura de queda, havendo sempre uma pequena diferença de, no máximo, 3 cm.

4.2 Resultados obtidos

4.2.1 Análise visual dos provetes ensaiados

Uma análise visual foi a primeira a ser realizada, imediatamente após cada ensaio efectuado. Observou-se o estado geral da peça, a extensão da destruição causada pelo impacto e algum problema que possa ter ocorrido durante o ensaio.

A Figura 4.3 ilustra o resultado de dois dos ensaios QS efectuados. O ensaio na estrutura da esquerda (hexagonal) foi realizado durante mais tempo, atingindo uma perfuração maior, devido ao facto de esta ser mais rígida, tendo assim menos facilidade de ser atravessada totalmente. Observam-se dois padrões bastante distintos, sendo o primeiro bastante limpo, tendo a forma do impactor e não comprometendo o resto da estrutura, e o segundo bastante mais amplo, causando

uma destruição mais alargada e distribuída. A primeira conclusão que se pode inferir deste facto é a de uma dispersão de energia mais eficaz na geometria auxética (imagem da direita).

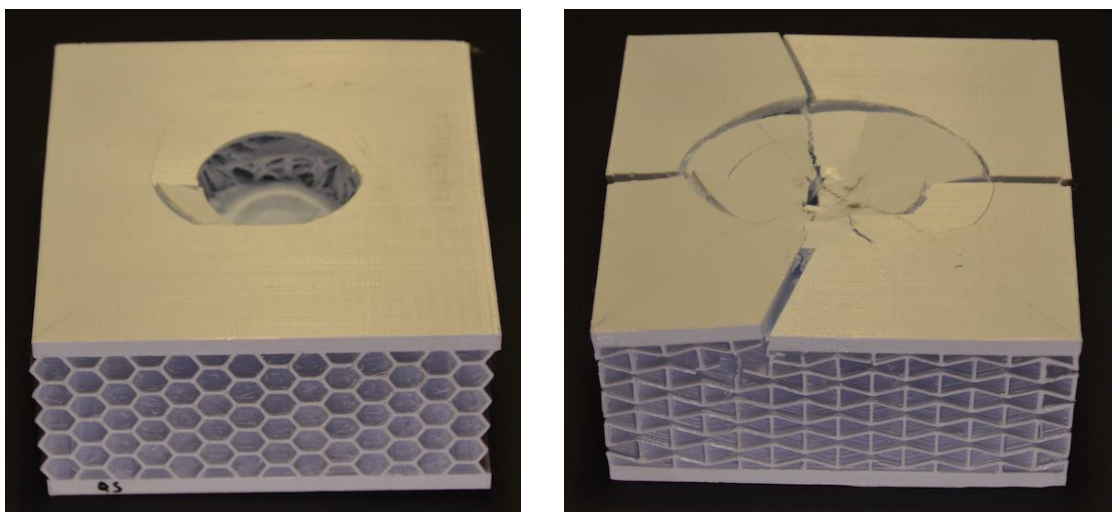


Figura 4.3 - Destruição causada por ensaios quasi-estáticos em dois provetes de geometria distinta.

O facto de o apoio ser cilíndrico e oco, causou igualmente danos na parte inferior do provete. Estes resultam do adensamento da estrutura por baixo do contacto com o impactor, resultando no fenómeno observável na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Pormenor do dano causado na parte inferior de um provete, sujeito a um ensaio QS.

Para o caso dos ensaios de impacto, a diferença entre as duas energias definidas é facilmente observável. Existe consideravelmente mais dano quando os provetes são sujeitos à energia superior, de 20 J (Figura 4.5).

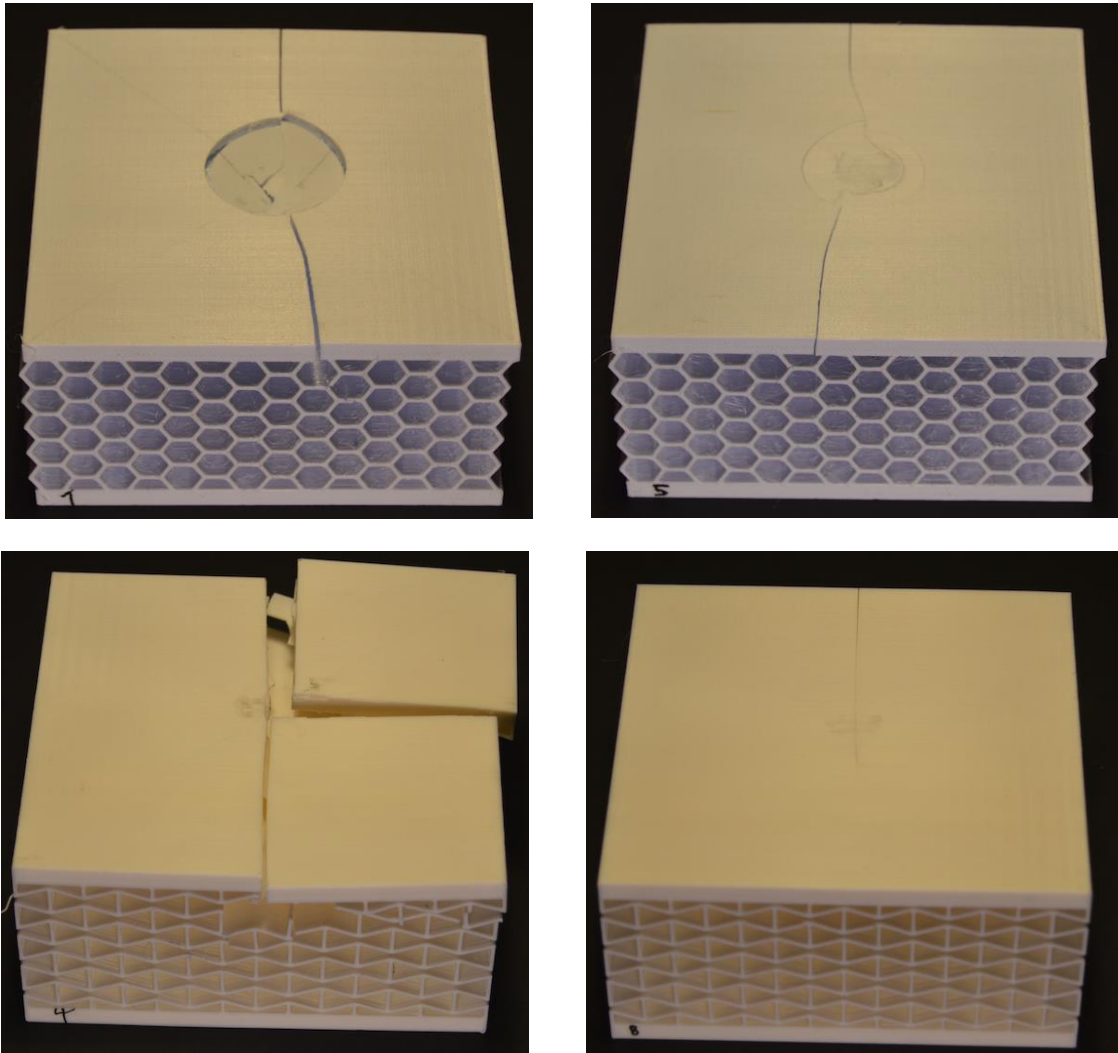


Figura 4.5 - Danos sofridos por dois provetes com as mesmas características, da 1ª série (esquerda) e da 2ª série (direita).

Alguns erros de impressão não são facilmente detectáveis a olho nú, evidenciando-se apenas na fase de ensaios. O caso do provete nº 2 é um evidente exemplo desse facto (Figura 4.6). No instante do impacto, sofreu uma quebra total, a cerca de 1/3 do provete. O facto de esta quebra ser limpa, sem estilhaços e na mesma camada de impressão, indica que aí existia algum tipo de fraqueza. Esta pode ter tido como origem uma falha de energia durante a impressão, ou alguma deficiência no filamento utilizado, causando este fenómeno.

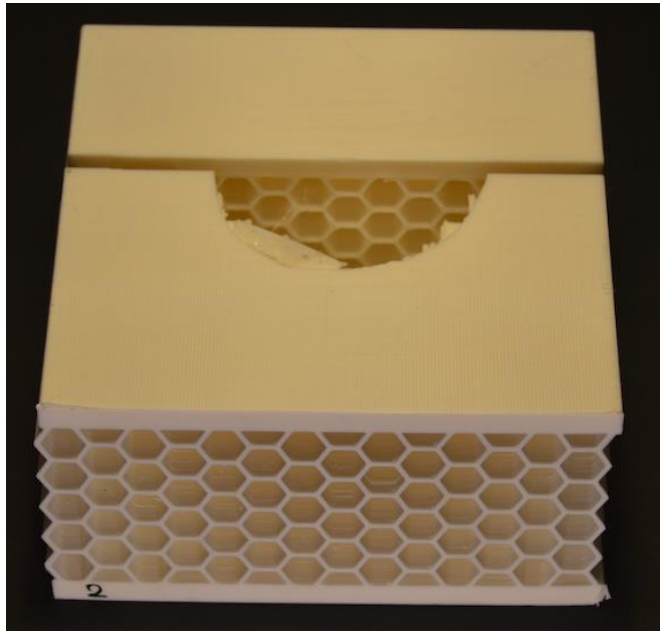


Figura 4.6 - Rotura total de um provete ocorrida por erro de impressão.

4.2.2 Ensaaios quasi-estáticos

Como foi referido anteriormente, todos os ensaios QS foram realizados com uma velocidade constante de cerca de 9 mm/min. No entanto, os ensaios efectuados nos provetes auxéticos possuem um deslocamento total bastante inferior aos hexagonais. Este facto deveu-se ao modo de rotura dos provetes auxéticos ser menos previsível que o observado para os hexagonais. Assim, de modo a garantir a integridade da célula de carga presente no impactor, estes ensaios foram terminados mais cedo, com uma carga inferior.

A Figura 4.7 apresenta os diagramas de força-deslocamento. Observam-se imediatamente diferenças significativas entre as duas geometrias. Os provetes hexagonais apresentam um comportamento elasto-plástico, com uma fase elástica e um patamar de cedência bastante vincado. Este, sobretudo no caso do PETG, não se mantém horizontal, mas aumenta com o deslocamento. Este fenómeno explica-se pela densificação da estrutura, pois à medida que se deforma e sofre roturas nas células, mais densa se torna no local da compressão, resistindo consequentemente a mais força.

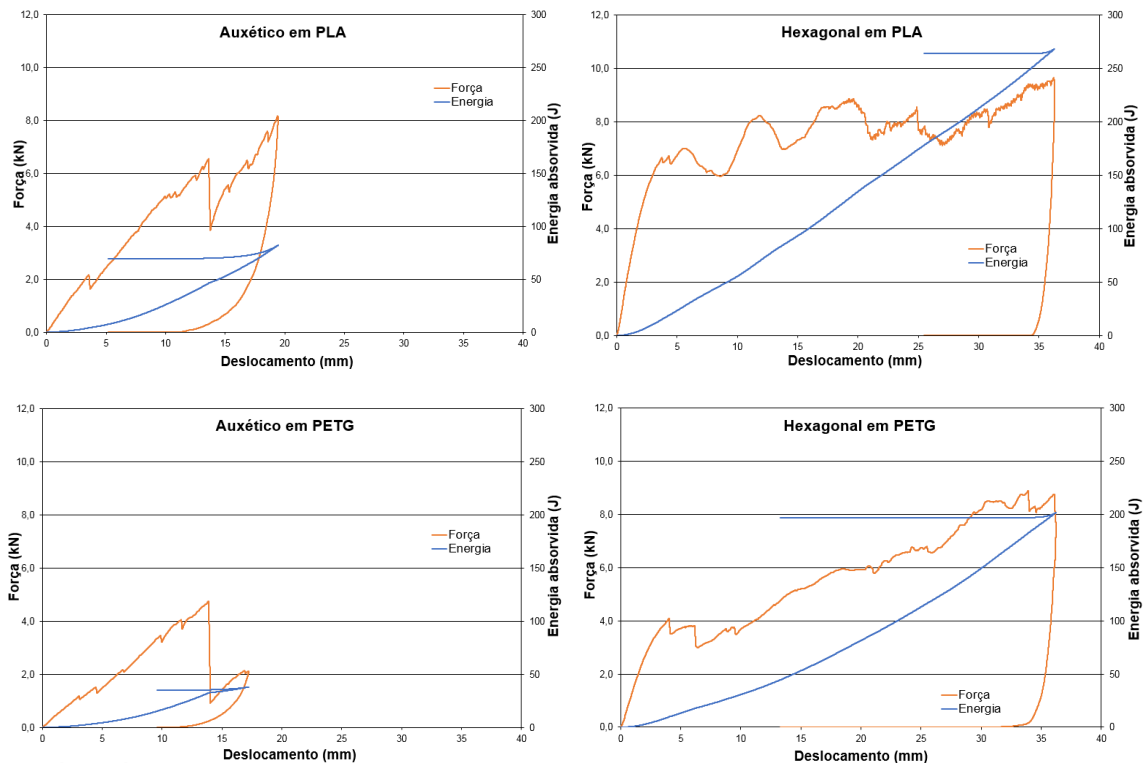


Figura 4.7 - Valores de força e energia obtidos através dos ensaios QS, nos 4 provetes ensaiados.

A Figura 4.8 apresenta uma comparação dos 4 provetes ensaiados, assim como o local considerado como o de rotura dos provetes, assinalado com um ponto e cruz. Esta ocorre em primeiro lugar para os hexagonais, por volta dos 6 mm de deslocamento, considerando-se igual para os dois materiais. Os auxéticos apenas sofrem essa rotura com mais do dobro do deslocamento (14 mm). Este local de rotura não representa a plastificação do material, mas o ponto a partir do qual as propriedades estruturais se alteram, ocorrendo fenómenos de densificação que não se consideram interessantes para este estudo.

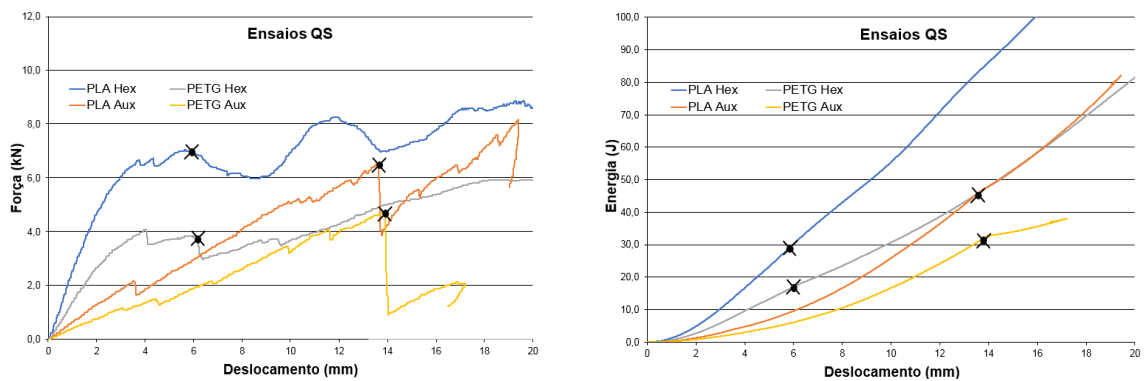


Figura 4.8 – Comparações, em função do deslocamento, da força e energia dos 4 ensaios QS realizados.

Os resultados obtidos através dos ensaios QS, com os valores medidos no momento da rotura plástica de cada provete, encontram-se apresentados na Tabela 4.2. O deslocamento necessário para atingir a rotura plástica nos dois materiais, para a mesma geometria, é praticamente o mesmo. No entanto, a força e energia necessárias para o atingir são bastante distintas. O PLA apresenta uma resistência bastante superior ao PETG, atingindo valores maiores de força aplicada. Consequentemente, o PETG permite maiores deslocamentos sujeito a forças similares.

Comparando as geometrias, a maior diferença foca-se no deslocamento necessário para atingir a rotura. Os provetes auxéticos apresentam uma flexibilidade muito superior, sendo capaz de absorver uma quantidade significativamente maior de energia. Por sua vez, os valores de força necessária para a rotura encontram-se dentro de parâmetros similares.

Tabela 4.2 – Valores limite da rotura plástica para os 4 provetes distintos.

Rotura plástica			
	d [mm]	F [kN]	E [J]
Auxético em PLA	13,6	6,5	46
Auxético em PETG	13,8	4,6	32
Hexagonal em PLA	5,8	7,0	28
Hexagonal em PETG	6,2	3,7	18

Os ensaios QS foram filmados com o objectivo de obter imagens dos vários estados de deformação das peças.



Figura 4.9 - Aparecimento da primeira rotura de uma célula num provete auxético em PLA, sujeito ao ensaio QS.



Figura 4.10 - Máxima deformação obtida antes do final do ensaio QS, num provete auxético em PLA.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam dois momentos que mereceram especial destaque quando do estudo dos vídeos realizados dos ensaios QS. A primeira (Figura 4.9) captura o momento da primeira quebra de uma parede de uma célula (neste caso, duas consecutivas em simultâneo). É interessante observar que esta quebra não ocorre na linha vertical do carregamento, mas um pouco desviada para o lado esquerdo visto que as propriedades de metamaterial mecânico desviam a força aplicada para diagonais, não se concentrando no local de solicitação.

Por sua vez, a Figura 4.10 representa o momento imediatamente antes do final do ensaio. Trata-se, portanto, do instante de maior deformação. Foi adicionada uma linha fictícia vertical do lado esquerdo da imagem, que representa o alinhamento inicial das células, antes do carregamento. O objectivo dessa linha é o de demonstrar claramente o comportamento auxético do provete, segundo o plano horizontal da imagem. Observa-se que as células se deslocam para o interior da estrutura, comprimindo-se horizontalmente ao serem sujeitas a uma compressão vertical. De igual forma, observa-se uma curvatura significativa na placa superior, que ocorre pela elasticidade geral da estrutura interna, que tal o permite.

A resposta estrutural aos ensaios QS dos provetes hexagonais foi bastante distinta (Figura 4.11). Visto que a estrutura é bastante mais rígida e não acompanha a deformação imposta pelo impactor, este causou a destruição total do material da sua área vertical de acção, não impondo danos ao resto do provete. Ao contrário do que aconteceu no caso anterior, a placa superior não teve possibilidade de se deformar, sendo perfurada com bastante facilidade. Assim, o resultado foi um dano de penetração perfeitamente cilíndrico, com o mesmo diâmetro do impactor, permanecendo o resto da estrutura intacta. À medida que o ensaio se desenrolou, o fenómeno de densificação tornou-se cada vez mais evidente. As linhas de células destruídas pela compressão dentro desse cilindro vão-se acumulando, apresentando cada vez mais resistência.

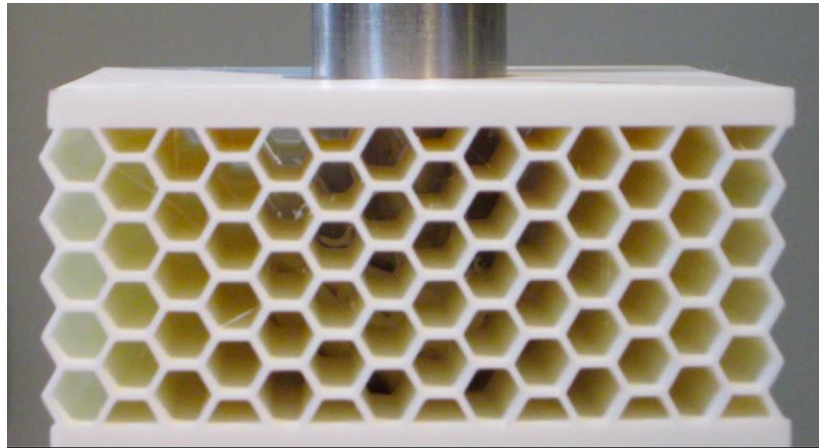


Figura 4.11 – Máxima penetração ocorrida no ensaio QS de um provete hexagonal em PLA.

O dano cilíndrico referido apresenta-se de forma clara na Figura 4.12. É possível observar que o troço cortado da placa superior se encontra ainda semi-intacto no fundo do cilindro. Torna-se igualmente interessante observar que as células adjacentes às destruídas se encontram intactas, tendo a compressão causado um corte limpo e perfeitamente vertical.

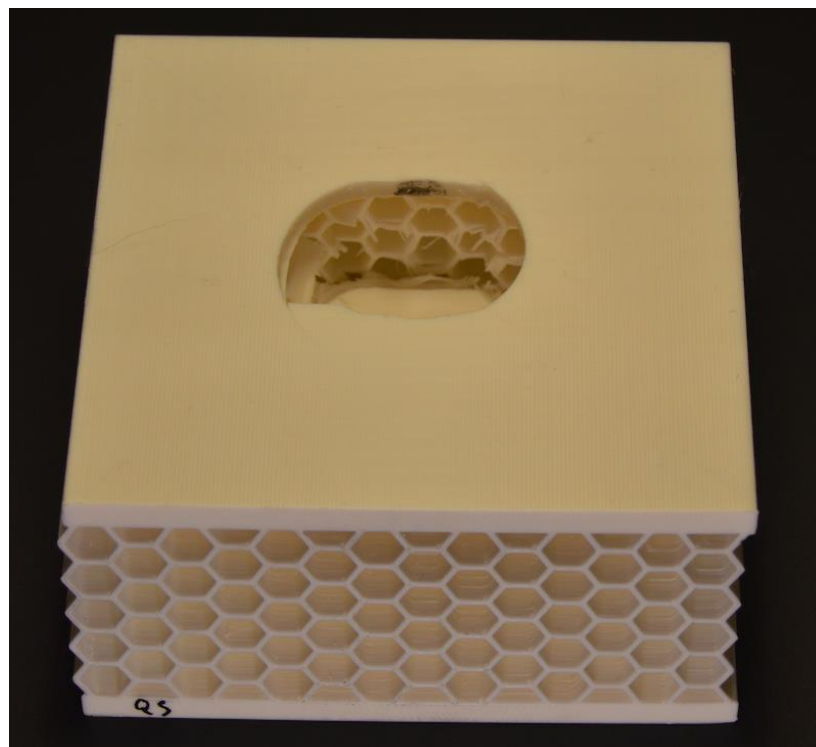


Figura 4.12 - Dano causado pelo ensaio QS no provete hexagonal em PLA.

4.2.3 Ensaios de impacto

4.2.3.1 Comparação entre as geometrias

Os dados de velocidade inicial e de força de impacto que serviram de base para esta análise foram recolhidos automaticamente pela máquina de impacto, ligada a um computador com um software compatível. Partindo desses valores, através de uma folha de cálculo, foi possível obter os valores de deslocamento multiplicando a velocidade do impactor pelo intervalo de tempo fixo entre valores consecutivos. Seguidamente, foi possível calcular a energia absorvida pela estrutura, através dos valores de força aplicada e de deslocamento. Tendo todos estes valores disponíveis para cada ensaio, foi então possível realizar várias comparações entre os diferentes provetes ensaiados.

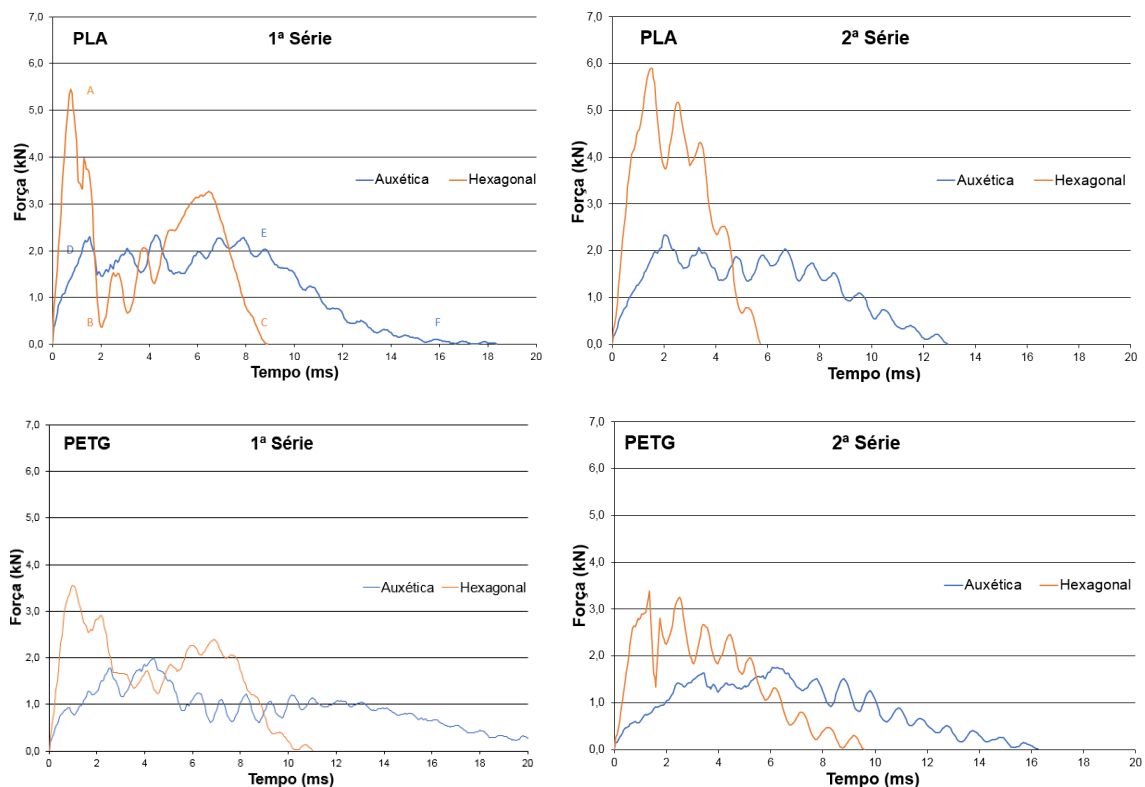


Figura 4.13 - Comparação da força actuante sobre cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.

A primeira comparação efectuada teve como base a força na interface entre o impactor e o provete. A diferença de resposta entre as duas geometrias, observada nos gráficos da Figura 4.13, é notória. A geometria auxética apresenta um pico máximo inferior a 2,5 kN (nos ensaios da 2ª série), enquanto que para a hexagonal, esse valor chega aos 6 kN. Para além do seu valor máximo se encontrar abaixo de metade da hexagonal, a geometria auxética apresenta um tempo de resposta

superior ao dobro. Este facto deve-se a uma mais eficaz absorção de energia pela totalidade da estrutura, devida à geometria celular reentrante, e a uma maior flexibilidade.

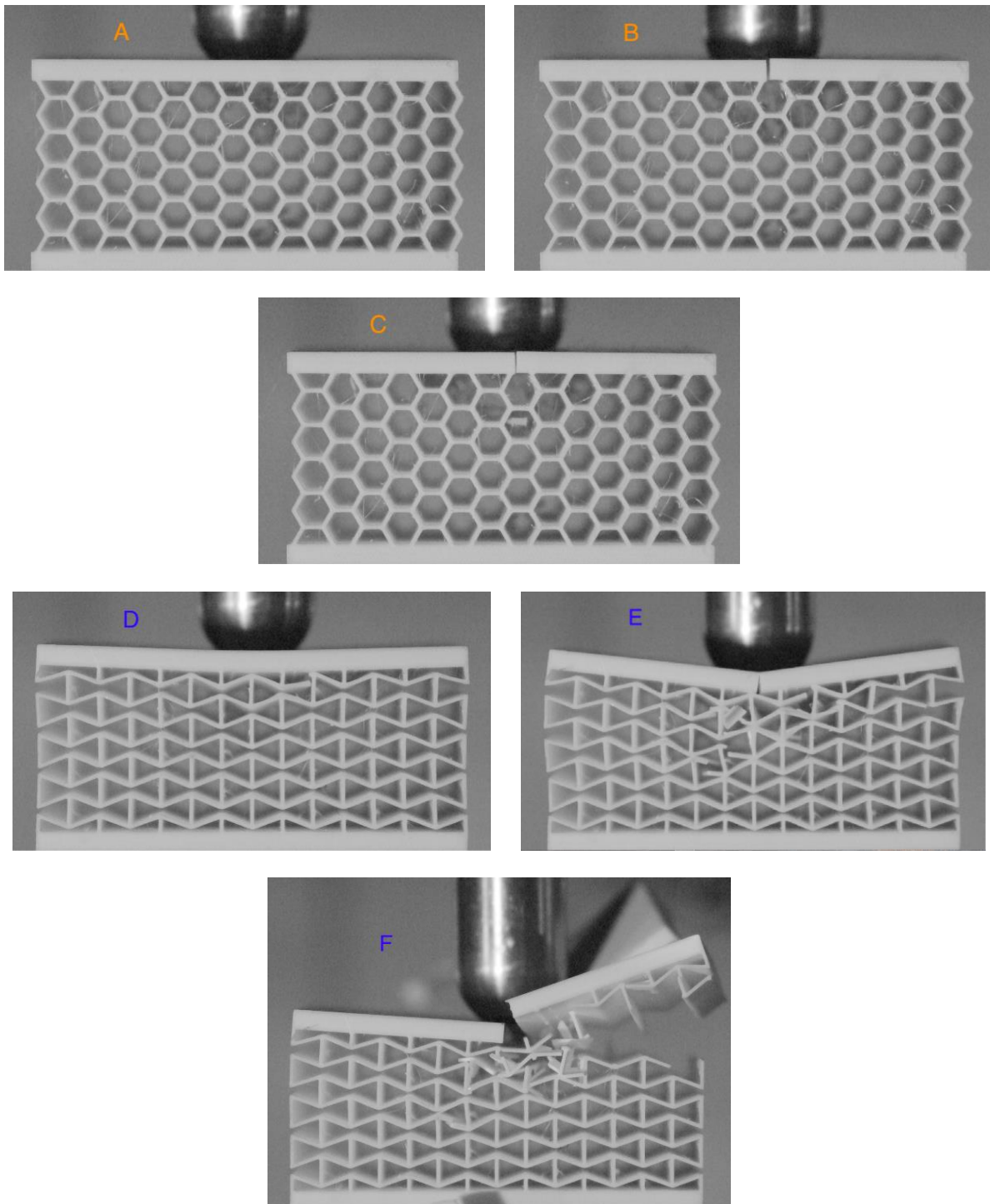


Figura 4.14 - Distintos momentos dos ensaios experimentais de impacto realizados em provetes de PLA, com uma energia de impacto superior a 20 J.

A pouca capacidade de deformação da geometria hexagonal apresenta-se bem visível na Figura 4.14. Os danos foram muito localizados sob o local de impacto, sendo apenas possível observar, neste plano, a rotura da placa superior, assim como da célula adjacente. Por sua vez, o

proвете auxético sofreu uma grande quantidade de danos. A força de impacto resultou na quebra da placa superior em 3 troços, separando totalmente 2 deles do restante provete. No entanto, estas quebras resultaram numa eficaz dissipação de energia, tendo este ensaio apresentado valores satisfatórios.

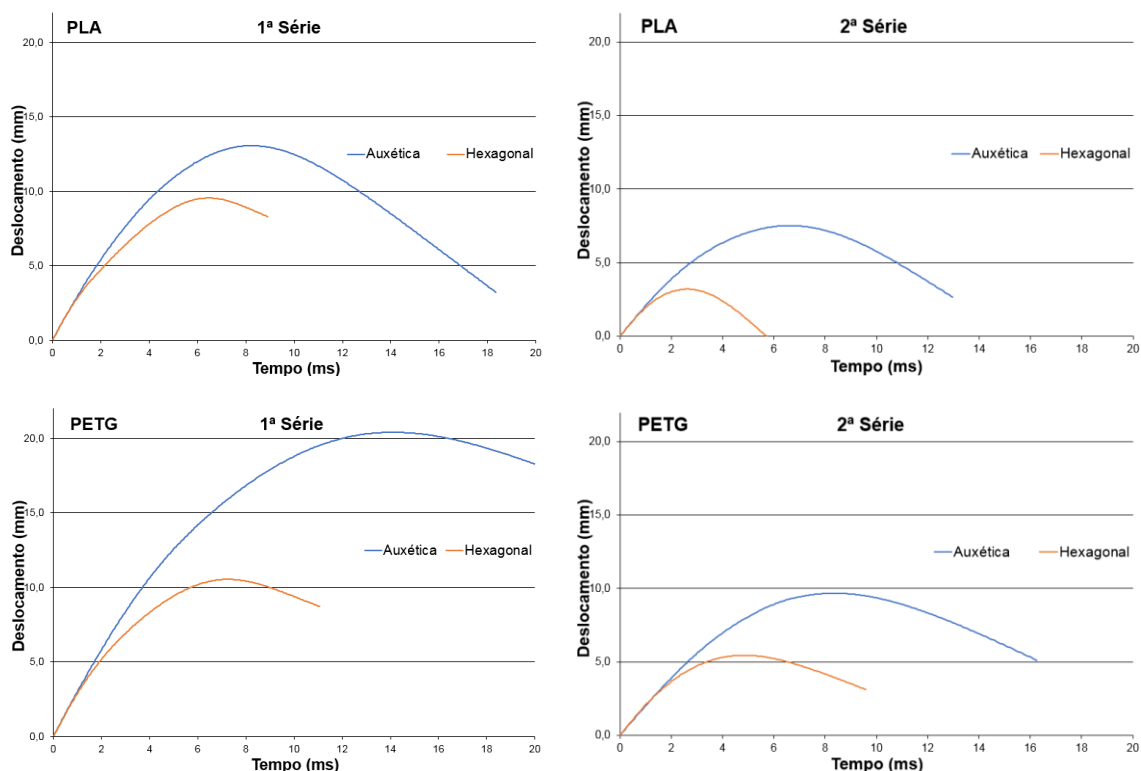


Figura 4.15 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.

Uma outra comparação efectuada foi a do deslocamento vertical ocorrido no ponto de contacto com o impactor. Na Figura 4.15 verifica-se a variação do mesmo, sendo possível observar o seu valor residual, após o final do ensaio. Tomando este como meio de comparação, conclui-se que para a energia inferior (2ª série), o provete hexagonal em PLA recuperou totalmente todo o deslocamento sofrido, enquanto que o auxético apresenta uma deformação residual de cerca de 2,5 mm. Visto que no primeiro não existe deformação residual, este traduz um comportamento praticamente elástico, sem grande dissipação de energia.

Neste ponto, a análise do gráfico da 1ª série (20 J) é mais interessante. Nos provetes em PLA, a diferença de deslocamento máximo passa a ser menos significativa, pois a plastificação e consequente dano dos dois provetes é bastante similar. No entanto, a grande diferença concentra-se na recuperação do deslocamento introduzido. O máximo deslocamento do provete hexagonal atinge cerca de 9,5 mm, sendo que recupera quase 1,5 mm (cerca de 15%), apresentando 8 mm de deslocamento residual. Por seu lado, o provete auxético apresenta um máximo de 13 mm, recuperando 10 mm na fase da descarga. Trata-se de uma recuperação superior a 75%, para um

deslocamento máximo 35% superior ao da hexagonal. O provete auxético em PETG apresentou valores de deslocamento bastante superiores, não tendo, no entanto, grande capacidade de recuperação do dano.

4.2.3.2 Comparação entre os materiais

Paralelamente à comparação efectuada entre provetes auxéticos e hexagonais, foi realizada nesta dissertação uma análise comparativa do comportamento dos dois materiais distintos: o PLA e o PETG. De igual forma, iniciou-se pelo estudo da força presente no local de contacto do impactor com o provete (Figura 4.16).

Observa-se, em todos os gráficos, um aumento mais rápido da força no PLA. Esta apresenta igualmente valores mais altos para este material. Para além do máximo ser inferior, o PETG apresenta um maior intervalo de tempo de contacto com o impactor. Este facto permite uma absorção mais gradual do impacto, assim como uma dissipação de energia superior.

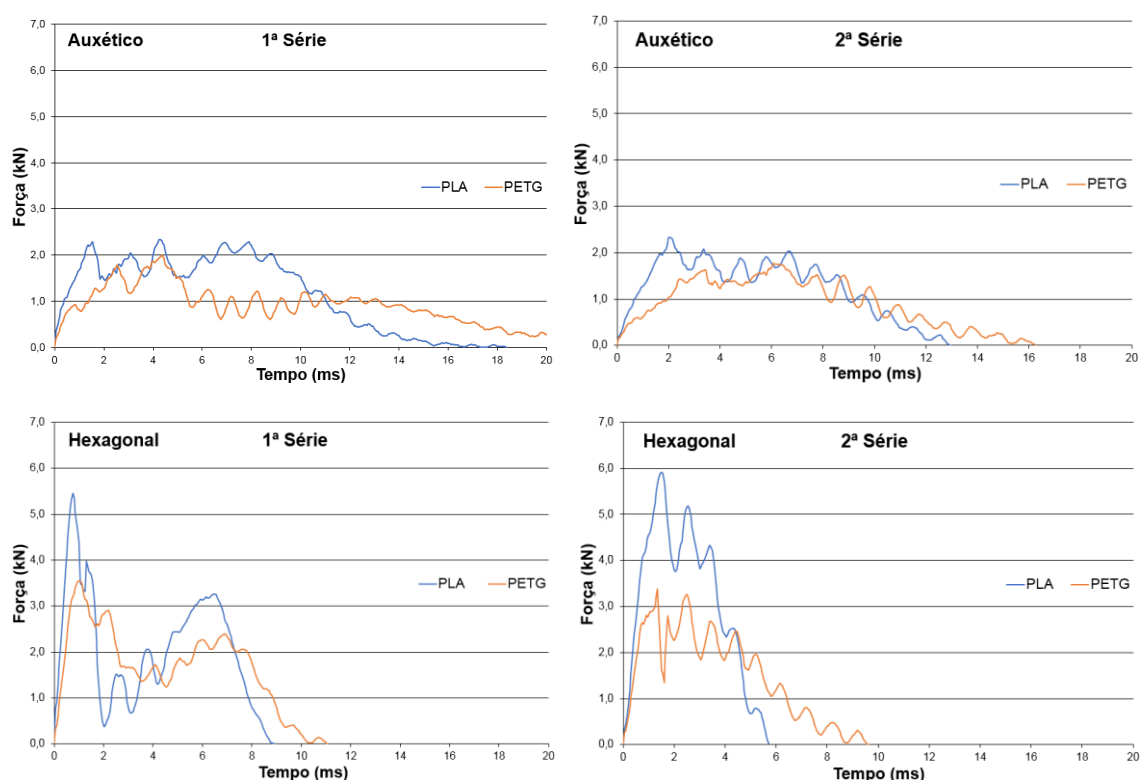


Figura 4.16 - Comparação da força actuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio experimental.

Os deslocamentos verticais ocorridos no ponto de contacto com o impactor apresentam maiores diferenças. Neste caso, o PETG apresenta deslocamentos bastante superiores ao PLA, aumentando a diferença com o aumento da energia de impacto. No entanto, sobretudo para o caso

da 1ª série, a restituição elástica do PLA é bastante superior à do PETG, sendo este igualmente um ponto interessante na comparação (Figura 4.17).

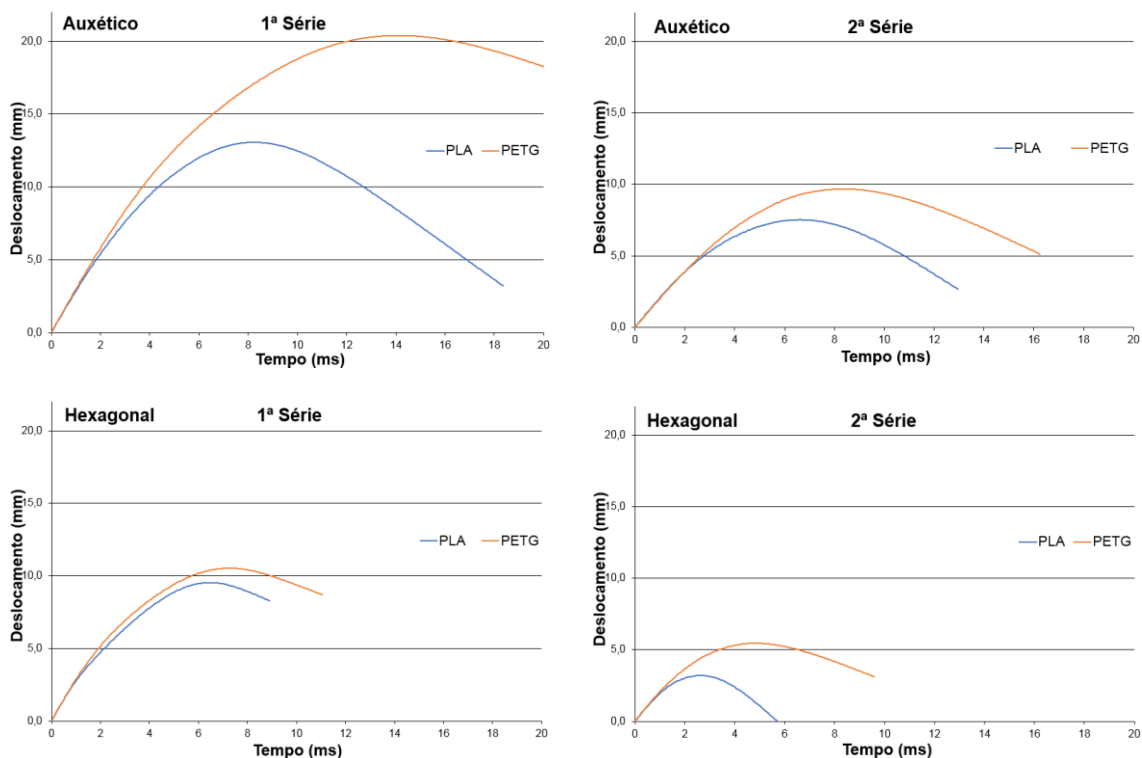


Figura 4.17 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada material ao longo do tempo do ensaio experimental.

4.2.4 Balanço energético

O objectivo deste trabalho foca-se na procura de soluções eficazes de absorção e dissipação de energia, de modo a mitigar os efeitos dos impactos nas estruturas. Assim, tornou-se necessário explorar em maior detalhe o balanço a nível energético para cada caso geométrico e de material distinto.

A primeira análise foi efectuada observando os gráficos de força-deslocamento da Figura 4.18, obtidos nos ensaios de impacto. A área da curva de força-deslocamento corresponde ao total da energia absorvida. Este valor, obtido através do processo de integração, corresponde à energia de impacto do respectivo ensaio.

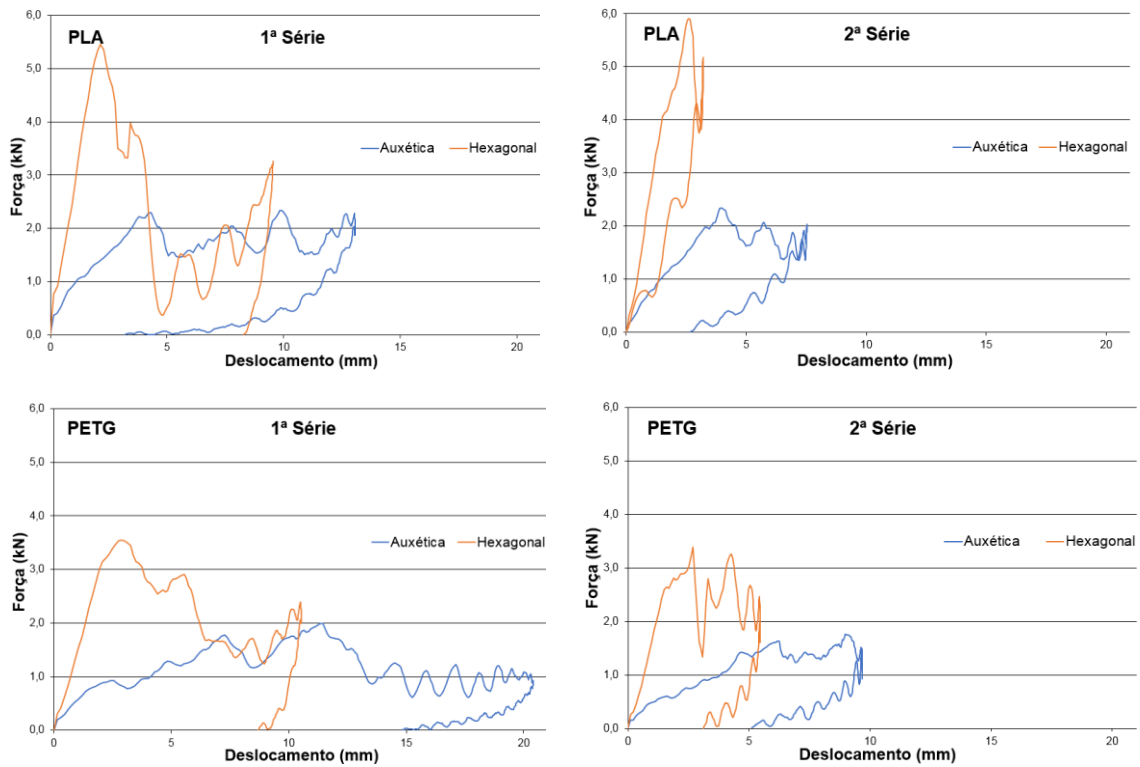


Figura 4.18 – Gráficos de força-deslocamento dos ensaios de impacto realizados.

Após realizado esse estudo de integração das curvas acima apresentadas, foi possível obter gráficos de energia dos provetes, ao longo do tempo de ensaio. Como foi visto anteriormente na Tabela 4.1, as energias de impacto foram sempre um pouco superiores ao esperado. Esse facto é facilmente observável em todas as curvas da Figura 4.19. Observa-se um pico máximo de energia absorvida igual ao valor da energia de impacto, seguido de um decréscimo de energia até ao ponto em que o contacto já não existe com o impactor. Esse ponto representa o valor de energia dissipada pelo provete ao longo do ensaio, sendo a energia de ressalto do impactor equivalente à diferença entre a energia dissipada e a energia de impacto.

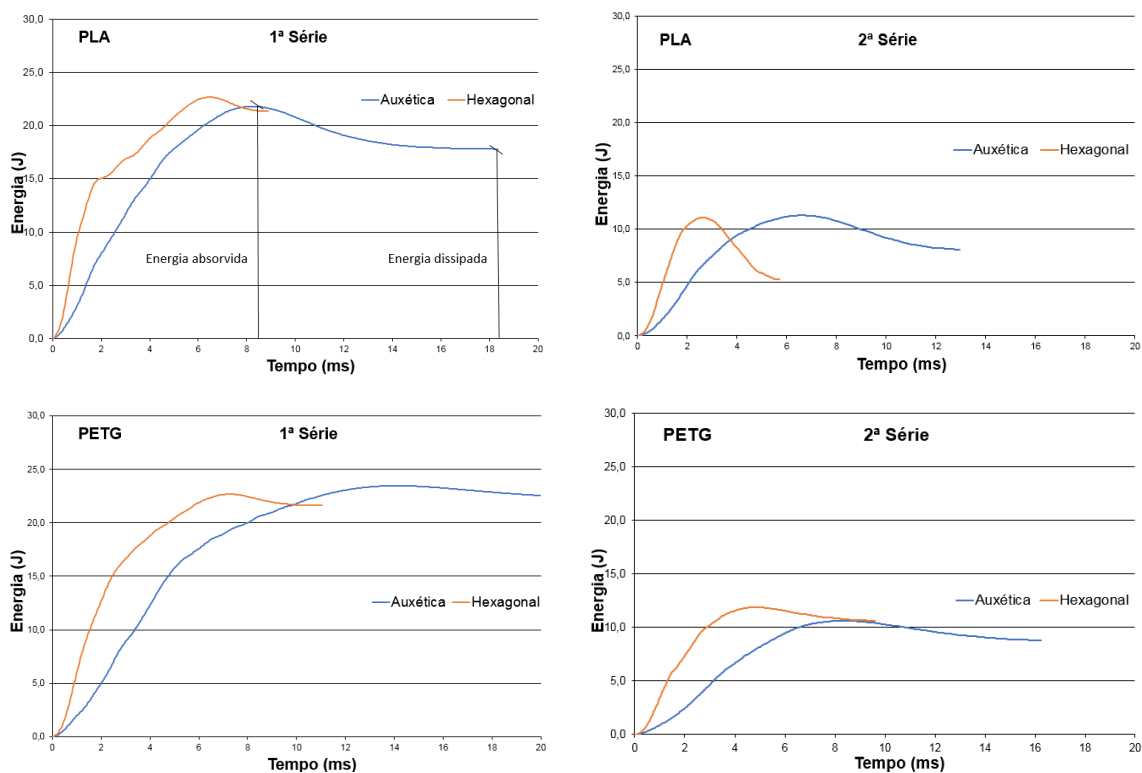


Figura 4.19 - Comparação da energia absorvida na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio experimental.

Uma outra forma de apresentar estes dados é através da energia cinética (Tabela 4.3). Sendo que existe uma dissipação de energia (E_d), esta é representada pela diferença entre a energia cinética final (E_{cf}) e a inicial (E_{ci}). Assim, sabendo as velocidades iniciais e finais do impactor em cada ensaio, recorrendo à fórmula (4.1), determinaram-se todas elas.

Tabela 4.3 – Balanço energético de cada ensaio de impacto realizado.

	V_i [m/s]	V_f [m/s]	E_{ci} [J]	E_{cf} [J]	E_d [J]	E_d [%]
Auxético	2,95	1,22	21,05	3,63	17,42	82,8
PLA	2,11	1,12	10,85	3,01	7,84	72,3
Auxético	3,04	0,67	22,04	1,08	20,96	95,1
PETG	2,04	0,82	10,08	1,61	8,47	84,0
Hexagonal	3,01	0,74	22,01	1,32	20,69	94,0
PLA	2,11	1,55	10,72	5,81	4,91	45,8
Hexagonal	3,01	0,64	22	0,99	21,01	95,5
PETG	2,18	0,69	11,49	1,17	10,32	89,8

Com base na tabela anterior, foi possível obter algumas conclusões acerca do comportamento energético de cada caso. Independentemente da geometria e do material, os ensaios de menor energia de impacto apresentam uma menor dissipação de energia. Este facto deve-se à maior plastificação e destruição interna dos provetes para energias de impacto superiores, o que leva a uma maior dissipação de energia por essa via. Para o primeiro caso, a fase elástica representa ainda um factor importante na resposta da estrutura, possuindo uma maior capacidade de absorção de energia e deslocamento, mas menor de dissipação e amortecimento. Exemplo disso é o provete hexagonal em PLA, que para o ensaio da 2ª série apenas dissipou metade da energia de impacto, sofrendo danos muito pouco significativos na sua estrutura.

A maior diferença de energia dissipada observável foi entre os dois materiais distintos utilizados. O PLA apresenta valores significativamente inferiores para quase todos os casos, demonstrando a sua maior elasticidade comparada com o PETG. De igual forma, sendo no entanto menor a diferença de valores, a geometria auxética apresenta uma menor dissipação de energia. Este comportamento pode ser explicado pela sua elasticidade e pelo facto de sofrer menos roturas de células, limitando as perdas inerentes a esse dano. No entanto, esse défice é compensado pela deformação existente, que distribui a força por uma área bastante superior, mitigando os efeitos da mesma.

4.2.5 Coeficiente de Poisson

Tendo como base as imagens recolhidas dos ensaios pela câmara de alta velocidade, foi possível estudar as deformações que ocorrem em cada geometria. A análise mais interessante é a do coeficiente de Poisson real do provete auxético.

O software Photron Fastcam Viewer (PFV), compatível com a câmara Photron utilizada, permite desenvolver essa análise. Escolheu-se para análise o frame imediatamente antes do patamar de cedência elástico, isto é, antes da primeira fractura, visto ser esse o momento do maior coeficiente de Poisson elástico (em módulo). No mesmo frame, o software permite a medição de deformações, sabendo as medidas iniciais do provete. Foi então possível obter a deformação vertical imposta pelo impactor, e a consequente deformação horizontal devida ao efeito de Poisson (Figura 4.20).

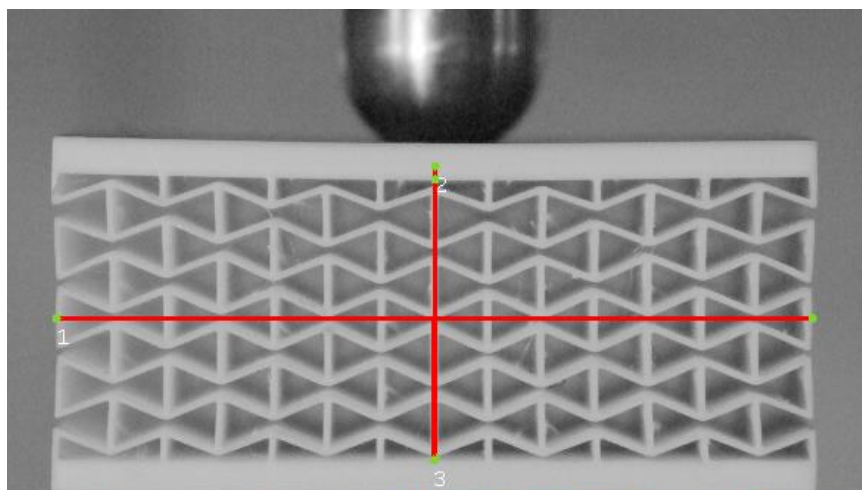


Figura 4.20 - Método de determinação dos deslocamentos vertical e horizontal, no software PFV.

A obtenção de resultados por este meio possui algum erro associado, sendo no entanto a forma mais eficaz de o fazer. Os valores obtidos de deslocamento vertical e horizontal para as duas geometrias, assim como o respectivo coeficiente de Poisson, apresentam-se na seguinte tabela:

Tabela 4.4 - Valores do coeficiente de Poisson de cada geometria distinta, obtidos experimentalmente.

	Hexagonal	Auxético
Deslocamento vertical [mm]	1,28	1,56
Deslocamento horizontal [mm]	0,24	-0,59
Coeficiente de Poisson [ν]	0,19	-0,38

Os valores obtidos encontram-se dentro do espectável. O coeficiente obtido de -0,38 para o provete auxético representa um valor bastante satisfatório, que produz resultados bastante favoráveis, como foi verificado neste mesmo capítulo. Este coeficiente, no entanto, não equivale ao máximo que pode ser obtido para este provete. Este máximo só poderia ser obtido com um ensaio de compressão da totalidade da placa superior, comprimindo todas as células de igual modo, atrasando a sua rotura elástica, contribuindo assim para o aumento do seu comportamento auxético.

4.3 Ensaios de tração

Paralelamente aos ensaios referidos acima, foram realizados ensaios de tração em 6 provetes, em formato de “dog bones”, sendo 3 em PLA e 3 em PETG. Estes ensaios tiveram como objectivo a obtenção de uma correlação entre as características de resistência à tração dos dois plásticos

utilizados. Esta correlação permitiu obter as características necessárias para uma modelação experimental o mais aproximada possível.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios Zwick (Figura 4.21), presente no Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL, na Caparica. A Tabela 4.5 apresenta as características dos provetes:

Tabela 4.5 - Características dos provetes ensaiados à tração.

		Massa [g]	d_1 [mm]	d_2 [mm]
PLA	1º Provette	16,15	13,94	6,05
	2º Provette	16,16	13,95	6,15
	3º Provette	16,17	13,91	6,04
PETG	1º Provette	15,91	14,20	6,37
	2º Provette	15,84	14,05	6,38
	3º Provette	15,80	14,20	6,44

Sendo d_1 a largura da zona estreita do provete, e d_2 a espessura do mesmo.

Os provetes caracterizados acima, sendo os em PETG apresentados na Figura 4.21, foram impressos com uma inclinação das linhas de impressão igual a 45°, da horizontal e da vertical.



Figura 4.21 – Metodologia de ensaio utilizada e resultado final dos provetes em PETG, após os ensaios.

Os gráficos da Figura 4.22 resultam desses mesmos ensaios. A tensão foi obtida através do quociente entre a força exercida e da área da secção mais fina do “dog bone”.

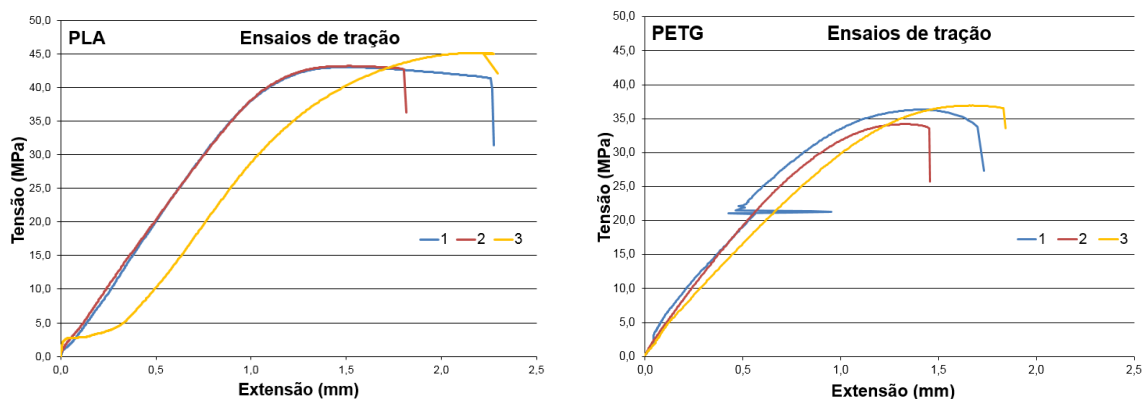


Figura 4.22 - Gráficos de tensão-extensão resultantes dos ensaios de tração realizados.

Apesar do ensaio do 1º provete em PETG apresentar algumas oscilações localizadas, consideram-se todos eles como sendo válidos, pela sua proximidade de resultados. Assim, foi possível obter uma média dos 3 ensaios de cada material, de modo a comparar os valores máximos de tensão no ponto de rotura, de cada um dos dois.

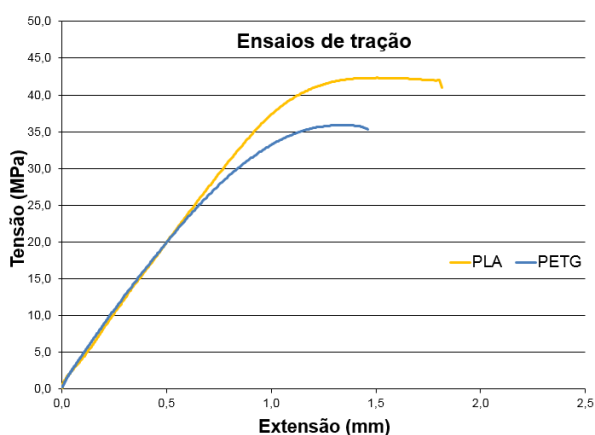


Figura 4.23 - Comparação dos valores das tensões dos dois materiais ensaiados.

Analisando a Figura 4.23, foi possível obter os valores máximos de tensão de cada um dos materiais. O valor máximo de tensão atingido, no PLA, foi de aproximadamente 42,3 MPa, enquanto que no PETG foi de cerca de 35,9 MPa.

4.4 Conclusões

A primeira conclusão obtida através dos ensaios físicos foi bastante clara: o provete auxético, nestas condições, apresentou um comportamento bastante mais favorável relativamente à mitigação da energia de impacto, comparado com o hexagonal. Este facto deve-se à

maneabilidade da sua geometria, que se ajusta de modo a ser cada vez mais resistente à medida que é comprimida. Assim, em vez de apresentar uma rigidez muito grande logo no momento do impacto (como é o caso da hexagonal), esta rigidez é gradual, permitindo um decréscimo gradual de velocidade e energia do impactor. No que toca ao dano sofrido nos ensaios, este foi bastante mais extenso e disperso no auxético. Este facto é igualmente positivo, visto que a absorção de energia abrange uma área maior, não estando concentrada no local de impacto, obtendo assim melhores resultados.

Os resultados observados relativos aos materiais foram mais equilibrados que os das geometrias. No entanto, são observáveis diferenças significativas no comportamento de cada um. O PLA apresenta melhores valores de resistência máxima, sendo um material mais frágil. Por sua vez, o PETG possui um comportamento mais dúctil, sendo a sua quebra mais gradual e menos repentina. O PLA é o material mais utilizado para este tipo de impressões. O PETG apresenta uma boa alternativa, quando se procura uma protecção contra impactos de pequena energia. Nestes casos, este possui uma grande capacidade de absorção de energia. Para o caso de impactos superiores, o PLA continua a ser a opção mais viável, pois apesar de não possuir tanta capacidade de deformação, possui uma maior capacidade de dissipação de energia por plastificação. Assim sendo, a escolha do material deverá ter em conta a sua finalidade.

5 Modelação numérica no software LS-DYNA



Este capítulo aborda os ensaios numéricos efectuados no software LS-DYNA, todos os procedimentos de validação necessários para os efectuar e os resultados que a partir deles foram obtidos.

5.1 Introdução ao software LS-DYNA

O LS-DYNA foi desenvolvido e é comercializado pela empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Trata-se de um software de cálculo automático que visa resolver com facilidade problemas dinâmicos, tais como impactos ou explosões, que resultem em danos, deformações ou penetrações que se pretendam quantificar. O programa realiza a sua análise através de uma modelação em elementos finitos. Estes, dispostos adequadamente, simulam o comportamento de qualquer geometria desejada.

A introdução da geometria no software é realizada através de um ficheiro IGS (ou IGES), que significa *International Graphics Exchange Specification*. Este tipo de ficheiro tem como função a transferência, entre softwares de desenho, de modelos ou sólidos de uma qualquer geometria. Assim, é possível desenvolver a geometria num programa mais indicado para tal, sendo depois transferida para o LS-DYNA. No presente caso, o software de desenvolvimento das geometrias foi o AutoCAD.

5.2 Características da modelação numérica

5.2.1 Definição das malhas de elementos finitos

- Geometrias internas dos provetes:

Tendo em conta o facto de as paredes das células possuírem uma espessura pequena, foram utilizados elementos *Shell* para esse efeito. O refinamento da malha foi caracterizado pelo número de elementos em cada face de uma célula (sendo esta auxética, hexagonal ou rectangular).

Considerou-se que um número de elementos por face inferior a 4 não traria problemas de estabilidade, e não permitiria obter os resultados pretendidos. Assim, foi realizada uma análise comparativa da malha de 4 elementos, com uma malha de 6 e outra de 8 elementos por face, de modo a verificar a convergência dos resultados, com o propósito de utilizar a malha com um menor número de elementos possível, economizando recursos computacionais. Essa convergência é observada na Figura 5.1, que traduz a força medida na superfície de contacto entre o impactor e o provete, para um dado ensaio de impacto. Conclui-se assim que uma malha de 4 elementos por face é suficiente para a obtenção dos resultados desejados (Figura 5.2).

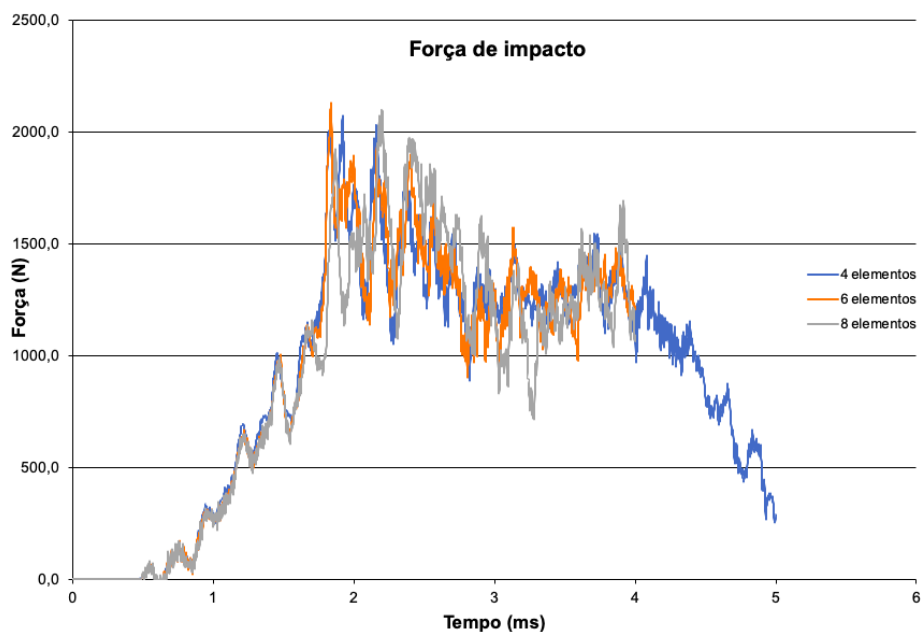


Figura 5.1 - Força de impacto para diferentes refinamentos de malha da geometria auxética.

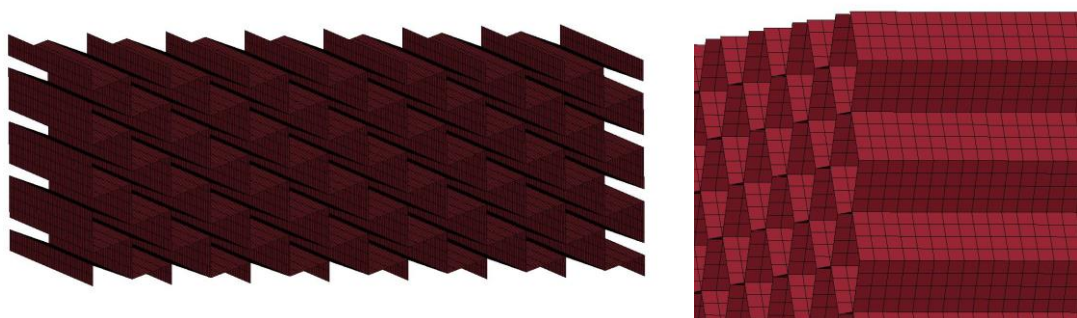


Figura 5.2 - Malha definida para a geometria auxética (esquerda) e pormenor das 4 filas de elementos que compõem cada face da geometria hexagonal (direita).

- Placas superior e inferior:

As duas placas, devido à sua espessura elevada (0,5 cm), foram definidas como sólidos. Procurou-se que a sua malha fosse uniforme, composta por cubos com as mesmas dimensões em todas as

direcções (Figura 5.3). Definiu-se igualmente a malha de tal forma que a junção das faces da geometria interna com as placas fosse num local de fronteira entre elementos (Figura 5.4).

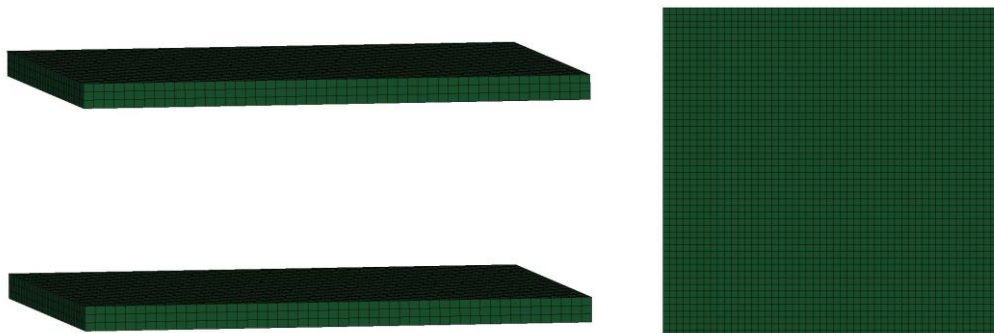


Figura 5.3 - Disposição das duas placas (esquerda) e dispersão da malha definida (direita).

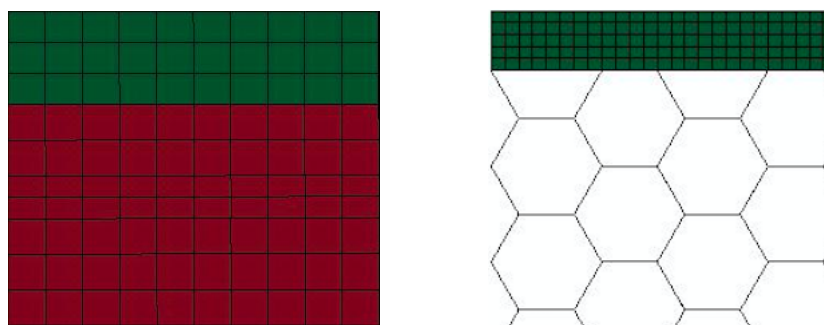


Figura 5.4 - Pormenores da escolha da malha para as placas superior e inferior.

– Apoio:

O objectivo da modelação do apoio foi a de simular o apoio utilizado nos ensaios físicos. Assim, foi modulada uma chapa de aço, fixa em todas as direcções, com medidas similares, e discretizada com elementos do tipo *Shell*, gerados automaticamente pelo software, com o comando *AutoMesher*, observável na Figura 5.5. Tal como nos ensaios físicos, o provete encontra-se apoiado sobre esta chapa, estando restrito apenas o deslocamento vertical através da placa. O facto de os elementos que compõem a malha serem rectangulares faz com que estes não se ajustem correctamente à geometria imposta. Para este caso em concreto, tal não é significativo por se tratar do apoio, e por todos os movimentos dos seus nós se encontrarem bloqueados.

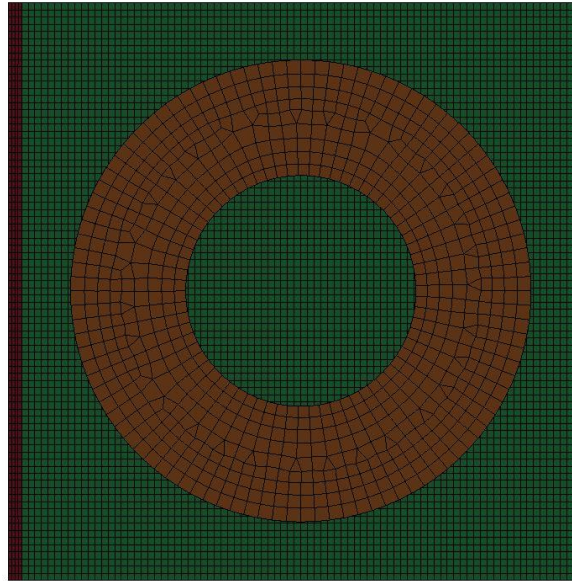


Figura 5.5 - Vista inferior do apoio utilizado.

– Impactor

O impactor modelado para esta análise foi um sólido esférico, de aço, com 30 mm de diâmetro (Figura 5.6). Deste modo garantiu-se que a área de contacto com o provete se equipara à dos ensaios físicos. Embora se trate de uma esfera de pequenas dimensões, a sua massa foi igualada aos 4,853 kg do impactor físico, através de um aumento do peso volúmico. A sua malha é composta por 90 elementos, não sendo necessário refiná-la significativamente por se tratar de um sólido onde não se procura obter resultados de deformação, por exemplo.

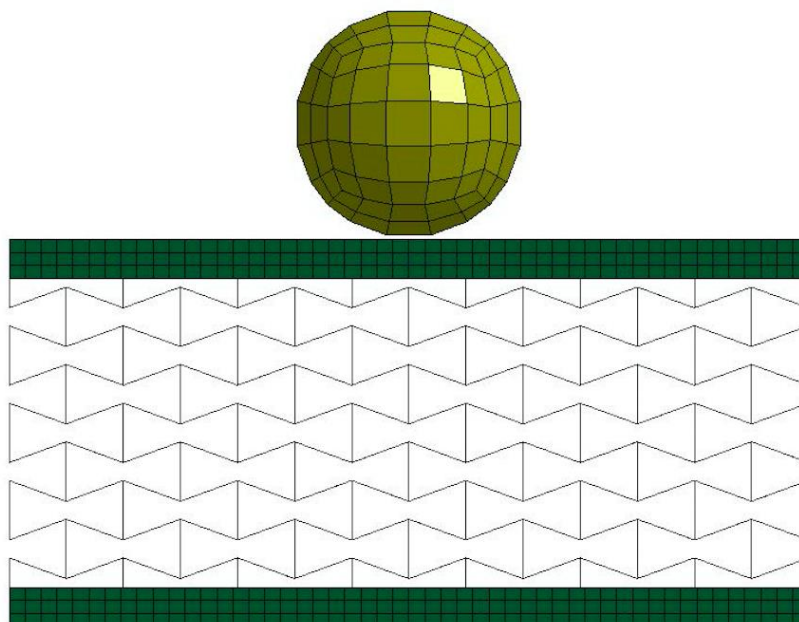


Figura 5.6 - Impactor utilizado para os ensaios numéricos.

5.2.2 Materiais utilizados

No total das modelações, foram utilizados 3 materiais distintos: o PLA, o PETG e o Aço. As suas características foram já estudadas por bastantes autores distintos (Tabela 3.3), embora se tenha sentido necessidade de aprofundar o estudo de algumas delas, apresentadas na Tabela 5.1.

O limite de elasticidade (*Yield Stress*) foi o parâmetro que necessitou de uma maior atenção. Os valores definidos na Tabela 3.3 representam as características do material em bruto. No entanto, estas não se mantêm todas constantes no caso de o material ser utilizado para impressões 3-D. Um objecto impresso possui uma resistência bastante superior ao ser comprimido do que ao ser tracionado. Isto deve-se às junções de linhas sobrepostas de impressão pois, apesar de resultarem do derretimento e solidificação do material, produzem linhas de menor resistência quando tracionadas. Assim, o valor de resistência elástica foi definido, de modo conservativo, como sendo o de resistência à tração, para o caso de impressão de linhas na horizontal (0°).

Para o caso referido acima (0° de ângulo de impressão), o PLA toma o valor de limite de elasticidade de 26,42 MPa (Rebelo, Gregório, Rosa e Cismaçiu, 2019). Assim, com base nos valores apresentados na Tabela 3.3, e na correlação obtida através dos ensaios de tração, foi possível determinar o limite de elasticidade do PETG para o mesmo caso, que toma um valor de aproximadamente 22 MPa (Tabela 5.1).

Após esse primeiro ajuste, foi ainda necessário adicionar um coeficiente de erosão (*FS*), que provoca erosão no material e limita a resistência elástica do mesmo. Em termos práticos, pretende simular as fragilidades causadas pela impressão, ou por pequenas variáveis que possam ter ocorrido na altura dos ensaios. Este coeficiente foi obtido de forma iterativa, e tem como objectivo aproximar ao máximo os resultados de deslocamento vertical, força e deformação, aos obtidos anteriormente nos ensaios físicos. Não foi possível encontrar um valor ideal para as duas geometrias. Existia um valor de *FS* que aproximava com pouco erro cada geometria ao seu respectivo ensaio. No entanto, foi necessário definir um valor intermédio, que menor erro apresentasse nas duas geometrias em simultâneo, para cada material. Assim, os valores tomados para definir os materiais foram os seguintes:

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

	PLA	PETG	Aço
Massa volúmica [kg/m³]	1250	1290	7860
Módulo de Young [GPa]	2,4	1,5	210,0
Coefficiente de Poisson	0,33	0,33	0,28
Limite de elasticidade [MPa]	26,42	22,00	250,00
Coefficiente de erosão (FS)	0,22	0,24	0,00

5.2.3 Configurações do *keyword*

A configuração do ensaio numérico no LS-DYNA é realizada através de vários comandos, que controlam todos os acontecimentos do mesmo. O conjunto destes comandos denomina-se como *keyword*. Enumeram-se de seguida alguns dos mais importantes comandos utilizados para a calibração dos ensaios:

– *Boundary:*

Define todas as condições de apoio necessárias. Definiram-se, através do *SPC-SET*, as restrições necessárias para igualar o apoio ao real. Foram, neste caso, restritos todos os deslocamentos e rotações da placa de aço que simula o apoio.

– *Contact:*

Gere o modo como o contacto é realizado. Dentro deste, foi utilizado o *Automatic Single Surface*, que controla o contacto de elementos que compõem a mesma superfície. O objectivo da sua utilização foi o de controlar o contacto das células auxéticas, que se juntam quando sujeitas a compressão. Foi utilizado um coeficiente de fricção estático (*FS*) igual a 0,16, e um dinâmico (*FD*) igual a 0,10 (Behalek, Lenfeld, Seidl, Bobek, Ausperger, 2012).

Para regular o contacto entre superfícies distintas, foi definido o *Automatic Surface to Surface*. No caso do contacto entre materiais que possuem uma rigidez bastante distinta, como é o caso do contacto entre o impactor e a placa superior, e entre a placa inferior e o apoio, definiu-se o *Soft Constraint Formulation*. Este previne a ocorrência de penetrações excessivas causadas pela falha do material menos rígido.

Por fim, a ligação entre os nós da geometria interna e as placas, foi garantida com o comando *Tied Nodes to Surface*.

– *Control:*

Definiu-se, através do comando *Termination*, uma duração total do ensaio. Esta foi igual para todos os auxéticos, assim como para todos os hexagonais, embora diferente entre eles. Para os primeiros, pelo facto de necessitarem de mais tempo para absorver e contrariar o impacto, foi considerado um tempo de ensaio de 20 ms. Os segundos apenas necessitaram de metade (10 ms). Foi importante ajustar a duração do ensaio às necessidades de cada um, para não utilizar recursos computacionais desnecessários (tempo de análise e espaço de memória).

O comando *Timestep* configura o número de momentos de análise, durante a duração do ensaio. Multiplica o tempo mínimo de intervalo entre análises por um factor, que normalmente é de 0,9. Para casos dinâmicos, recomenda-se baixar esse valor para 0,67, sendo que neste caso foi utilizado um valor de 0,6, de forma a obter uma análise mais pormenorizada, visto que estas não eram demasiado demoradas (cerca de 20 minutos).

– *Database:*

Determina o formato do output dos resultados obtidos nos ensaios. Foram pedidas algumas opções *ASCII*, tais como o *MATSUM*, o *RCFORC* e o *SPCFORC*, que produzem ficheiros com os dados de força e energia obtidos. Escolheu-se o *Binary D3Plot* para realizar a análise do pós-processamento.

– *Hourglass*

O *Hourglass* limita problemas existentes nos modos de deformação de elementos com energia nula. Este introduz energia no modelo, de modo a limitar esses mesmos problemas. Procura-se que a energia de *Hourglass* seja inferior a 10% da energia interna do modelo. Foi definida a *EQ.5: Flanagan-Belytschko stiffness form with exact volume integration for solid elements*, com o $QM = 0,05$ (*Hourglass Coefficient*).

– *Initial*

Refere-se às condições iniciais de velocidade do impactor. Nos ensaios físicos, a energia foi ajustada através da altura de queda e, conseqüentemente, da velocidade de impacto. Assim, foi a partir deste comando que a velocidade foi ajustada, igualando-a à registada para cada ensaio distinto.

– *Material:*

Definiu-se, para os 3 casos, um material do género *003-Plastic Kinematic*. Este apresenta um comportamento elasto-plástico simples, ao serem introduzidos os valores de comportamento conhecidos para cada material. Estes valores podem encontrar-se na Tabela 5.1.

– *Section:*

Define o tipo de elemento finito a utilizar, assim como a sua espessura. Foram utilizadas secções do tipo *Shell* para a geometria interna e para a placa de apoio, com diferentes espessuras para cada uma das diferentes geometrias, e do tipo *Solid* para as placas e impactor. Foi definida a *EQ.10: Belytschko-Wong-Chiang* para definir a formulação dos elementos das secções do tipo *Shell*. Esta previne possíveis problemas relacionados com o empenamento, que podem ocorrer com a *EQ.2*, que é a pré-definida. Para o caso dos sólidos, definiu-se a *EQ.1: Constant stress solid element*, sendo esta a pré-definida.

5.3 Resultados obtidos

5.3.1 Validação do modelo numérico definido

Em primeiro lugar, foi necessário verificar que o modelo numérico definido produz resultados similares aos obtidos experimentalmente, que são os que se procuram simular. Com esse objectivo, apresentam-se abaixo os gráficos comparativos de força e deslocamento, dos dois tipos de ensaios.

Existem algumas diferenças entre os valores registados nos ensaios numéricos e experimentais. Estes podem derivar do ajuste das características numéricas do material, ou do facto das estruturas impressas serem anisotrópicas, não sendo esse facto tido em conta na modelação. No entanto, a maioria dos provetes apresenta um erro máximo de cerca de 10%, considerando-se esta margem como sendo aceitável para a validação dos ensaios numéricos.

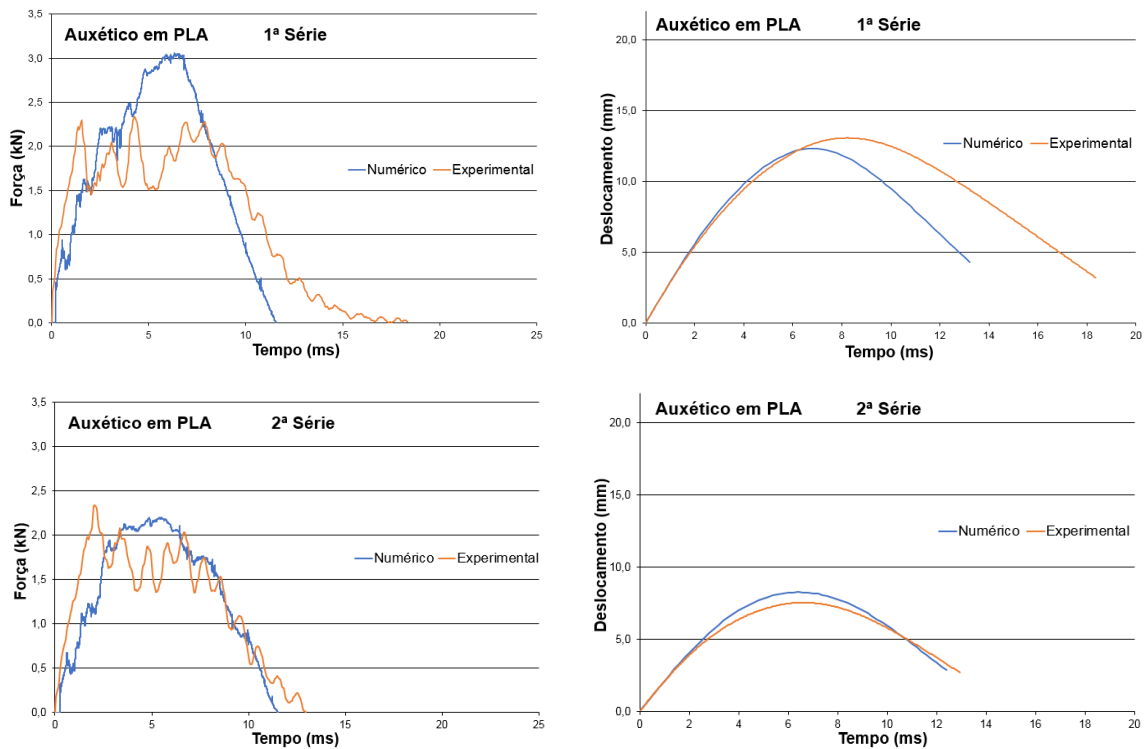


Figura 5.7 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete auxético em PLA.

Neste primeiro caso, na Figura 5.7, a modelação apresenta uma aproximação muito boa para o ensaio de menor energia. Esta distancia-se um pouco mais no caso do ensaio de maior energia, apresentando um pico superior ao experimental. Isto ocorre no caso auxético pois o coeficiente de erosão se encontra um pouco acima do ideal, causando uma maior resistência. Os ensaios com a geometria hexagonal apresentam uma leitura oposta, visto que o coeficiente escolhido teve como objectivo aproximar ao máximo as duas. Assim, o provete real sofre um pouco mais danos que o numérico, explicando a diferença existente na Figura 5.7.

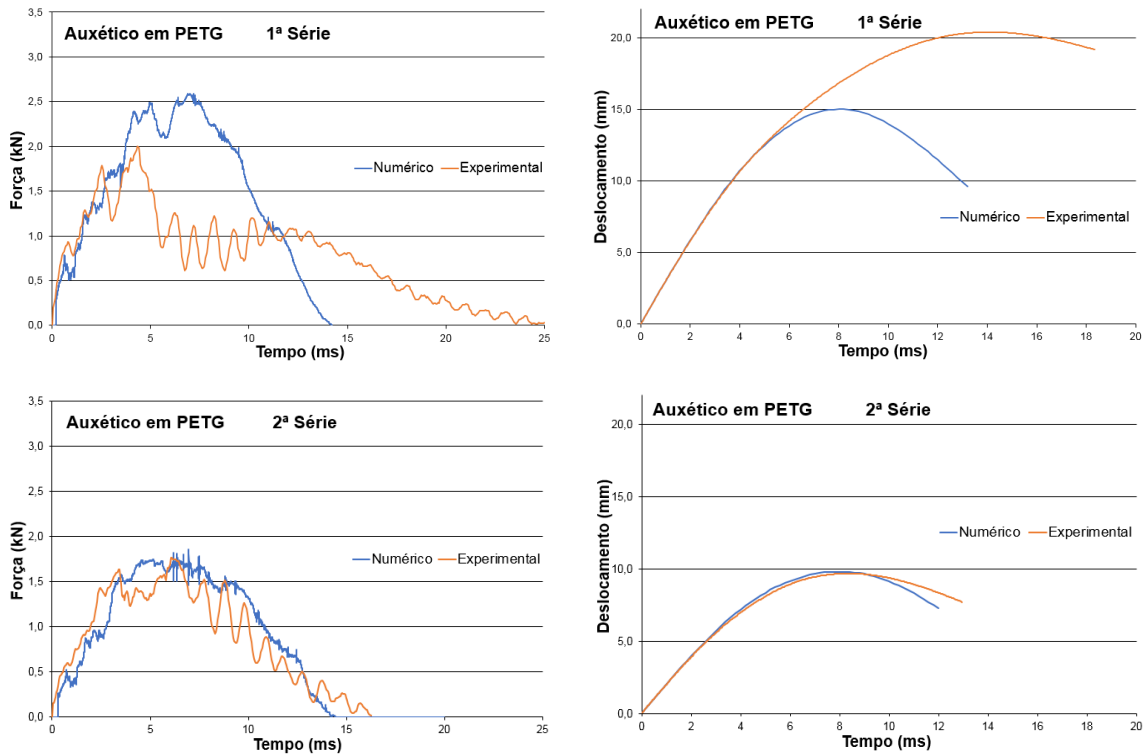


Figura 5.8 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete auxético em PETG.

O caso auxético em PETG (Figura 5.8) foi o que maior diferença apresentou a nível de deslocamento vertical. Enquanto que, para a energia de impacto menor, os resultados foram praticamente idênticos, o provete sujeito ao impacto experimental de maior energia sofreu uma grande quantidade de danos. Estes provocaram o grande deslocamento observável na figura acima, assim como a quebra no gráfico da força. Considerou-se que se tratou de um caso pontual, e que não punha em causa a validade dos modelos.

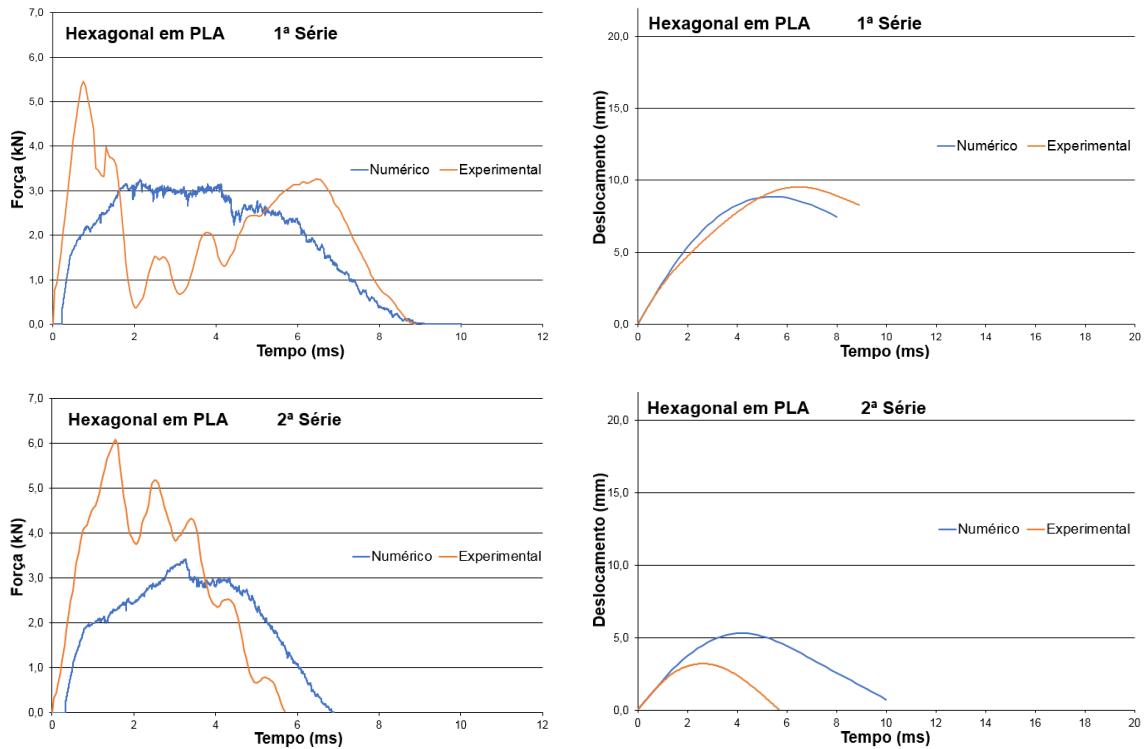


Figura 5.9 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete hexagonal em PLA.

A geometria hexagonal, por sua vez, apresenta uma diferença muito significativa na resistência para o ensaio de menor energia (Figura 5.9). O provete experimental praticamente não sofreu danos, enquanto que o numérico apresentou perdas de energia por plastificação significativas. Este facto mostrou ser uma fraqueza do modelo, não sendo preciso para a combinação hexagonal em PLA. Para a energia superior, esta geometria, nos ensaios experimentais, apresentou uma quebra significativa após o primeiro pico de força, seguida de um novo aumento da mesma. Não foi possível replicar tal comportamento no LS-DYNA, no entanto, o valor da área inferior a cada curva de força em função do tempo possui valores bastante similares, sendo comparável com base nesse facto.

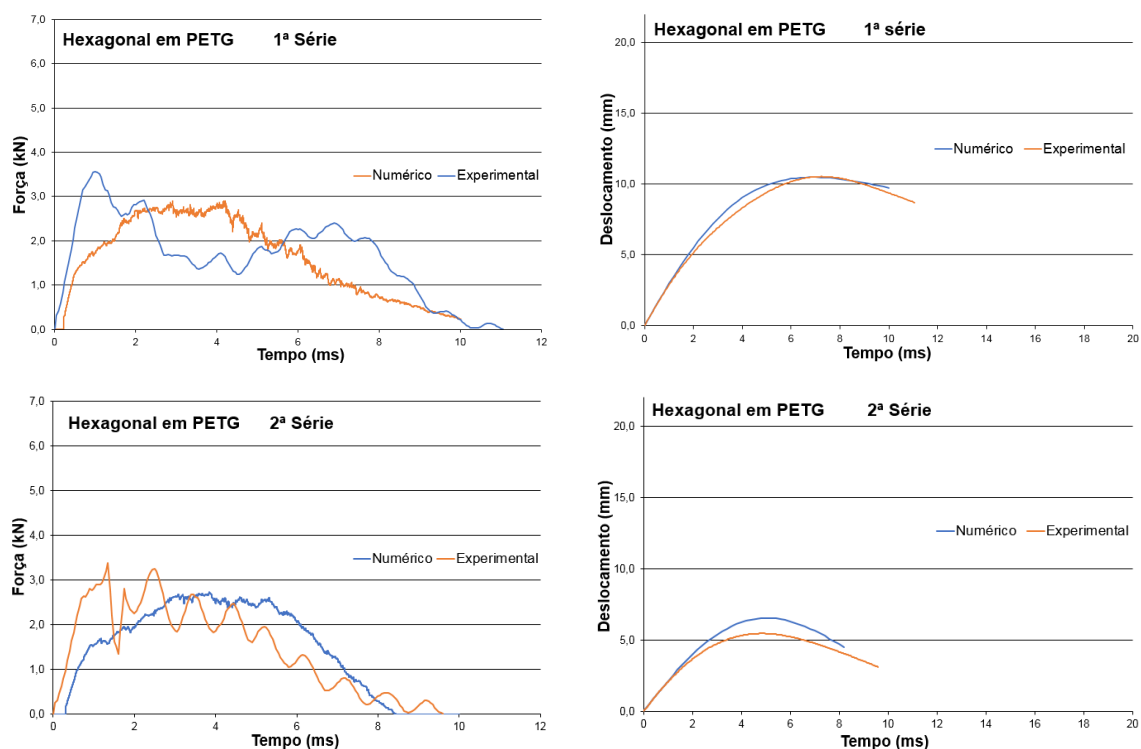


Figura 5.10 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, efectuados num provete hexagonal em PETG.

Este último exemplo, apresentado na Figura 5.10, apresenta bons resultados. A análise do ensaio de maior energia é similar à realizada para o provete anterior, sendo os deslocamentos apresentados praticamente idênticos.

Conclui-se que o modelo numérico realizado, apesar de possuir algumas falhas, apresenta, uma boa aproximação ao comportamento real das estruturas. No caso das auxéticas, os ensaios de menor energia são os mais próximos aos reais, sendo que o oposto ocorre para a geometria hexagonal.

5.3.2 Mecanismos de dissipação de energia

O principal mecanismo de dissipação de energia ocorre na fase plástica, com base na deformação e quebra das paredes das células mais esforçadas. No entanto, este não é o único fenómeno capaz de realizar essa mesma dissipação.

Verificou-se que existiam pequenas dissipações de energia em impactos que ocorriam em fase elástica. Este facto foi observado através das velocidades de impacto e de ressalto do impactor. O fenómeno aqui descrito é referido na literatura como perda de energia por propagação de ondas elásticas (Wu, Li, Thornton, 2005). De modo a que este pudesse ser observado, foram realizados

vários ensaios de impacto com energias de impacto sucessivamente superiores, de modo a poder comparar as velocidades iniciais e finais do impactor. A velocidade inicial foi definida no *keyword*, e a final foi medida após o ressalto. Esta última aparece na Tabela 5.2 em módulo. De modo a quantificar a diferença entre as velocidades, calculou-se um coeficiente de restituição (C_r), da seguinte forma:

$$C_r = \frac{V_i}{V_f} \quad (5.1)$$

Considerou-se que o final da fase elástica acontecia quando se evidenciaram os primeiros indícios de plastificação no local de contacto do impactor com a placa superior, embora a geometria interna se encontre ainda totalmente em fase elástica.

Primeiramente, estudou-se a geometria hexagonal em PLA. Iniciaram-se os ensaios com uma energia de impacto de 0,5 J, sendo esta aumentada sucessivamente até pelo menos 3 J após os primeiros sinais de plastificação. Os ensaios foram realizados com o impactor referido acima, sendo os valores de energia ajustados através da velocidade de impacto, como nos restantes ensaios realizados.

Tabela 5.2 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria hexagonal.

E (J)	V_i (m/s)	V_f (m/s)	C_r
0,5	0,45	0,44	1,03
1	0,64	0,62	1,04
2	0,91	0,84	1,08
3	1,11	0,93	1,19
4	1,28	0,98	1,31

As linhas sombreadas a verde representam os ensaios onde ocorre alguma plastificação. Nesses casos, C_r engloba as perdas de energia por propagação de tensões, assim como as perdas por plastificação.

No caso hexagonal visto na tabela anterior, a primeira perda de energia não foi muito significativa. No entanto, assim que se inicia a plastificação, observa-se um aumento rápido e acentuado da diferença entre as velocidades, atingindo-se valores de perda de energia bastante elevados muito rapidamente. Essa evolução do coeficiente de restituição é observável na Figura 5.11.

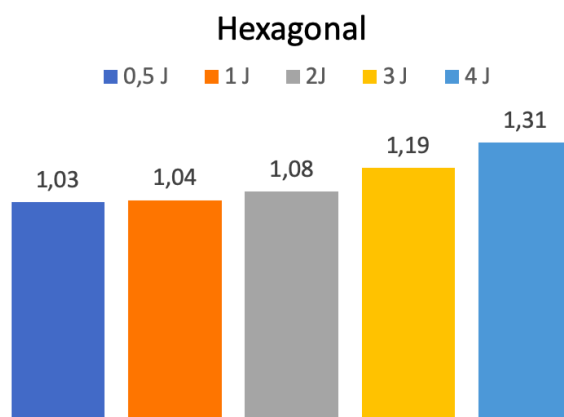


Figura 5.11 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria hexagonal.

O provete rectangular, exposto na Tabela 5.3, apresenta um comportamento bastante similar ao hexagonal. A plastificação ocorre no mesmo intervalo de valores. O que os distingue é o facto das diferenças de velocidade na geometria rectangular serem bastante mais ténues (Figura 5.12), mesmo após o início da plastificação. Apresenta um comportamento mais elástico, comparando-o ao anterior.

Tabela 5.3 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria rectangular.

E (J)	V_i (m/s)	V_f (m/s)	C_r
0,5	0,45	0,44	1,03
1	0,64	0,62	1,03
2	0,91	0,88	1,04
3	1,11	0,98	1,13
4	1,28	1,01	1,27

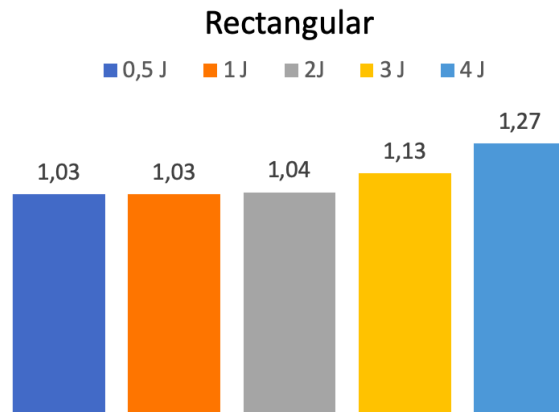


Figura 5.12 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria rectangular.

Por último, apresentam-se os resultados obtidos para a geometria auxética. Esta demonstra um comportamento diferente. Desde o primeiro ensaio, com uma energia muito baixa, existe uma diferença significativa nas velocidades estudadas. Esta mantém-se razoavelmente estável até ao início da plastificação. O fenómeno de perda de energia pela propagação de ondas de tensão, neste caso, não só é facilmente detectável como apresenta valores bastante interessantes (Figura 5.13).

Tabela 5.4 - Valores de velocidade do impactor obtidos para a geometria auxética.

E (J)	V_i (m/s)	V_f (m/s)	C_r
0,5	0,45	0,40	1,12
1	0,64	0,57	1,12
2	0,91	0,81	1,13
3	1,11	0,98	1,13
4	1,28	1,13	1,13
5	1,44	1,27	1,13
6	1,57	1,39	1,13
7	1,70	1,48	1,15
8	1,82	1,53	1,19
9	1,93	1,44	1,34
10,85	2,11	1,19	1,78

Este último valor de energia (10,85J) foi ensaiado de modo a poder ser comparado com o ensaio experimental correspondente. Nesse ensaio, o Cr obtido foi igual a 1,86, considerando-se a diferença entre os dois desprezável, e a análise numérica válida.

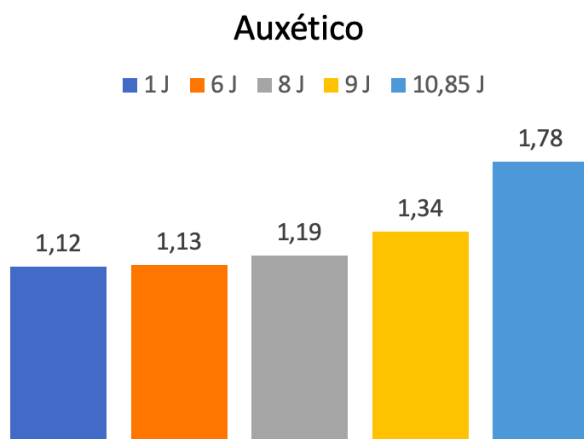


Figura 5.13 - Coeficiente de restituição de diferentes ensaios realizados na geometria auxética.

5.3.3 Análise do comportamento dos provetes

Como seria de esperar, os provetes de distintas geometrias apresentam comportamentos distintos quando sujeitos ao impacto. Antes de ser feita uma comparação directa entre os resultados obtidos de cada um, efectuou-se uma análise mais geral do comportamento físico dos provetes.

Realizou-se uma primeira análise a um provete auxético, em PLA. O ensaio escolhido foi o de 20 J, por ser o que causa um maior dano e deformação.

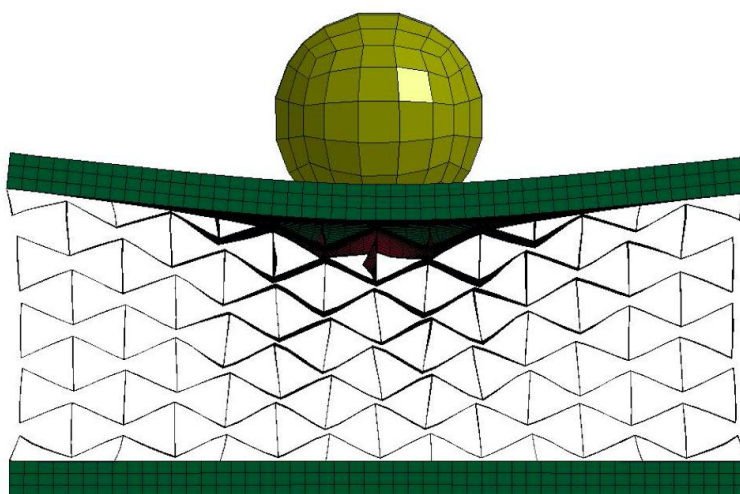


Figura 5.14 - Comportamento do provete auxético em PLA ao ser sujeito ao ensaio da 1ª série.

O comportamento auxético é facilmente observável na Figura 5.14. As células mais próximas do impacto contraem-se, diminuindo o seu comprimento horizontal.

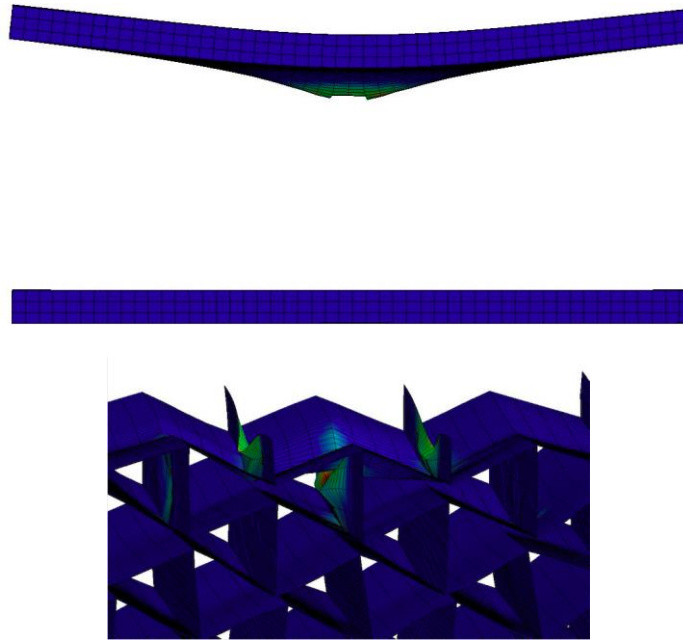


Figura 5.15 - Pormenores da plastificação da placa superior e da geometria subjacente de um provete de geometria auxética, em PLA.

A Figura 5.15 apresenta pormenores da deformação e plastificação da placa superior, assim como da geometria que se encontra mais próxima do local de impacto. O efeito da erosão nos elementos mencionado anteriormente, e calibrado através do *FS*, materializa-se na eliminação de elementos que atinjam o seu limite de resistência plástica. É possível notar a falha (e consequente eliminação) de alguns elementos sólidos (sujeitos a esforços de tracção) na parte inferior da placa, na zona de impacto. Este é o local sujeito a maiores esforços. A geometria interna, no entanto, sofre deformações consideráveis, embora esta seja localizada e sem perda de elementos.

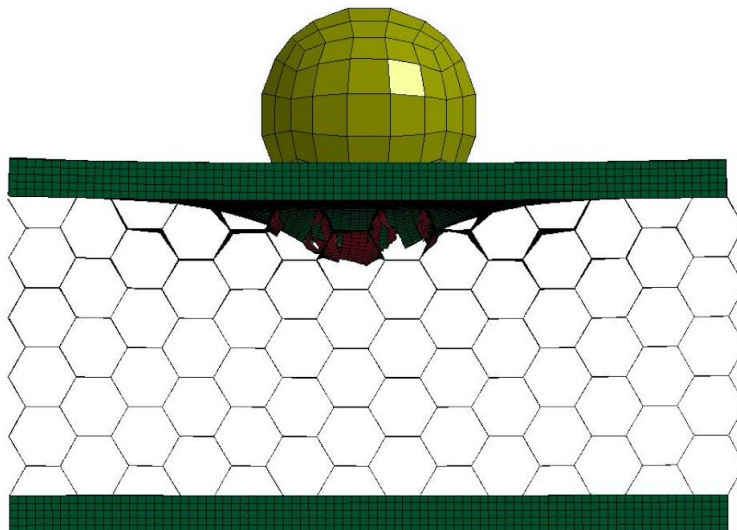


Figura 5.16 - Comportamento do provete hexagonal em PLA ao ser sujeito ao ensaio da 1ª série.

Uma segunda análise, efectuada a um provete hexagonal em PLA, revela um comportamento bastante mais frágil. Este não possui a capacidade de se deformar com tanta facilidade, pelo que sofre mais danos localizados na zona de impacto, embora sofra menos danos em zonas um pouco mais distantes.

Este tipo de geometria impede a deformação acentuada da placa superior, existente no exemplo anterior. Esta permanece praticamente plana, com excepção do local de impacto, não apresentando a curva observada na Figura 5.15. Assim, não sendo capaz de se deformar, apresenta um dano significativamente superior, com a eliminação de bastantes elementos que a compõem (Figura 5.16 e Figura 5.17).

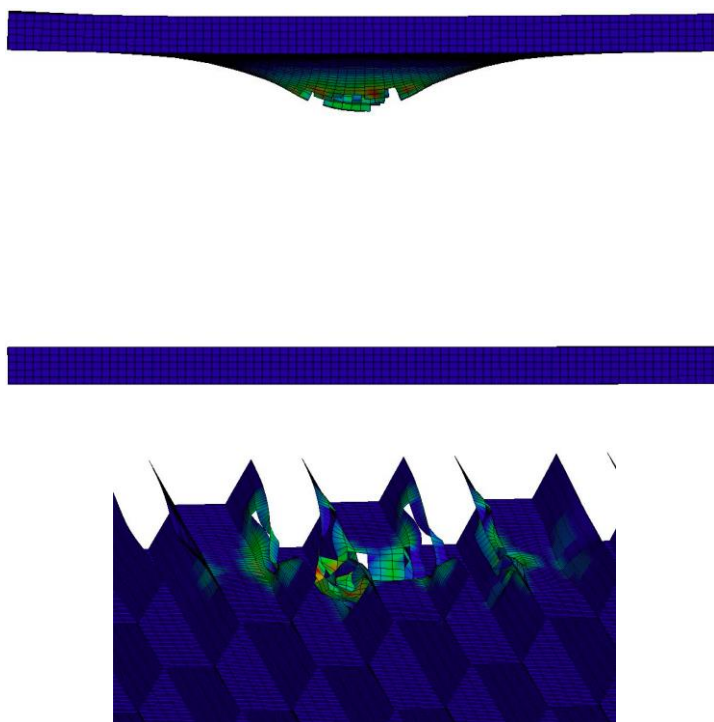


Figura 5.17 - Pormenores da plastificação da placa superior e da geometria subjacente de um provete de geometria hexagonal, em PLA.

Um outro instrumento de comparação e análise das geometrias foi a tensão de von Mises. Esta representa a tensão máxima presente em cada ponto da estrutura, tendo em conta todos os componentes da mesma. O estudo de tal tensão permite observar a sua distribuição, assim como os locais onde esta é superior, dando origem à rotura do material.

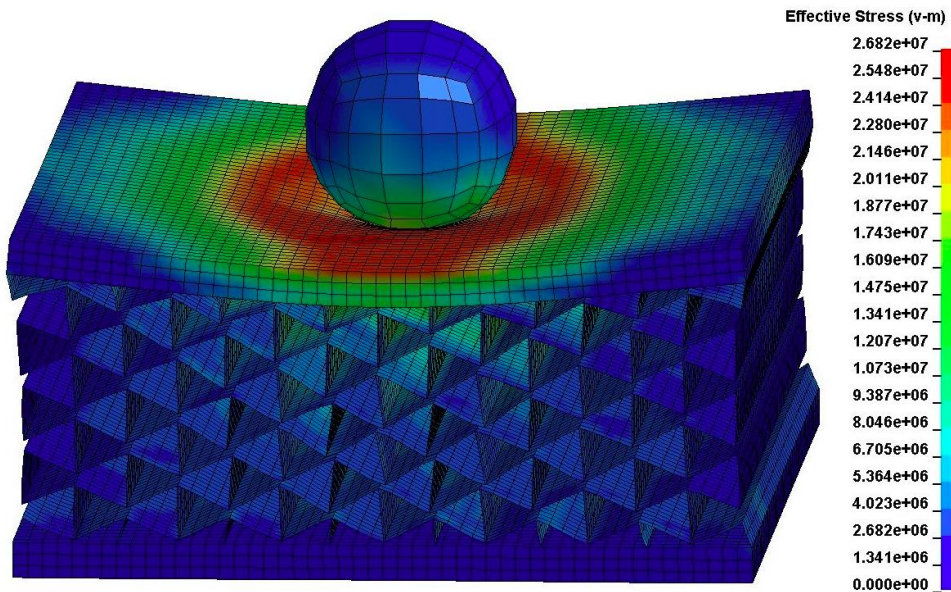


Figura 5.18 – Tensão de von Mises num provete auxético [Pa].

A comparação dos resultados apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19 corrobora as conclusões obtidas anteriormente. Torna-se possível observar que a placa superior da geometria hexagonal (Figura 5.16) possui uma distribuição de tensões bastante mais gravosa, devido ao facto de não se conseguir deformar, pela rigidez da geometria subjacente. Consequentemente, a distribuição de tensões pela geometria hexagonal foca-se bastante mais sob o local do impacto, não se propagando significativamente para a totalidade da estrutura. Este facto faz com que sofra um dano bastante mais localizado, não conseguindo atingir o nível de mitigação dos efeitos do impacto obtidos pela estrutura auxética.

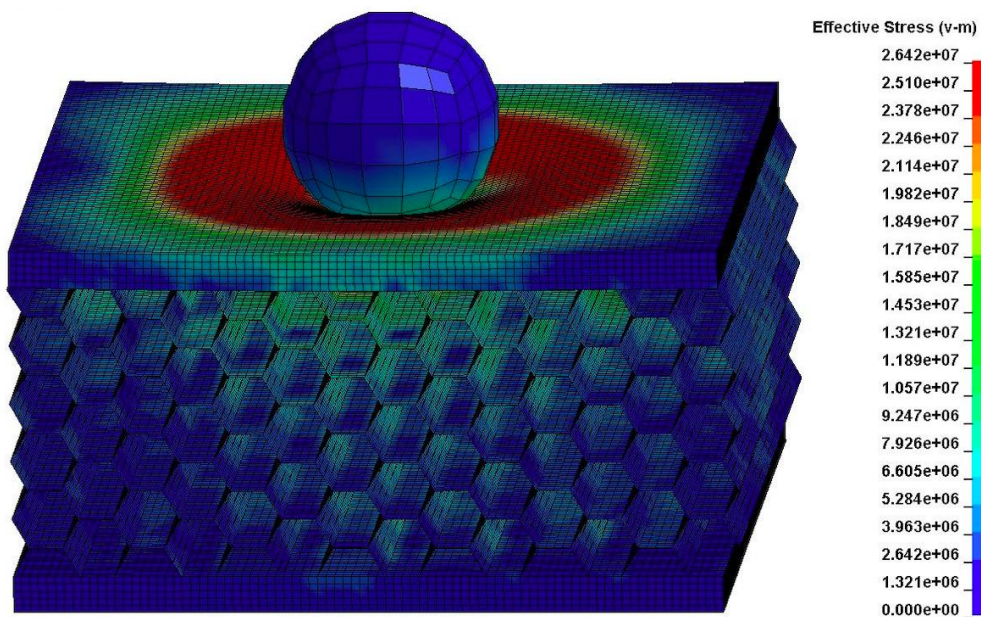


Figura 5.19 - Tensão de von Mises num provete hexagonal [Pa].

5.3.4 Comparação das geometrias

A comparação efectuada neste capítulo foi concebida de forma semelhante à previamente apresentada no capítulo 4, referente aos ensaios físicos. Em primeiro lugar, realizou-se um estudo comparativo das 3 geometrias distintas. A introdução da geometria rectangular teve como objectivo abordar uma alternativa à hexagonal, possuindo uma geometria mais simples. No entanto, os valores de força e deslocamento das duas foram muito similares, sendo que a rectangular apresenta resultados um pouco piores, como pode ser observado na Figura 5.20.

A geometria auxética apresenta grandes benefícios para as duas séries de ensaios. No entanto, esses benefícios são bastante mais significativos com a energia inferior. Esta não provoca grande plastificação nas estruturas, sendo a parte elástica a absorver a grande maioria da energia de impacto. Assim sendo, os provetes auxéticos possuem uma grande vantagem em relação aos demais. Apresentam uma força no local de impacto de cerca de 60% da dos restantes, e um tempo de actuação da mesma de praticamente o dobro. No caso da maior energia, essas diferenças diminuem significativamente, não deixando, no entanto, de ser a melhor opção para uma mitigação eficaz da força de impacto.

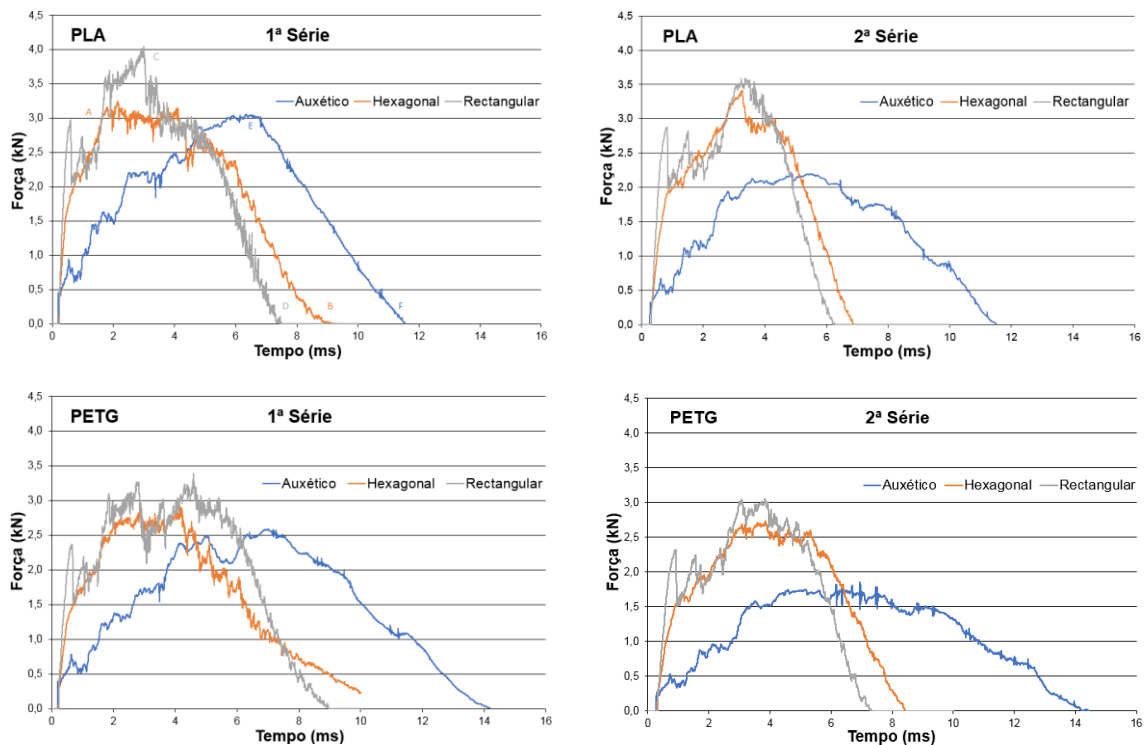


Figura 5.20 - Comparação da força actuante sobre cada geometria ao longo do tempo do ensaio numérico.

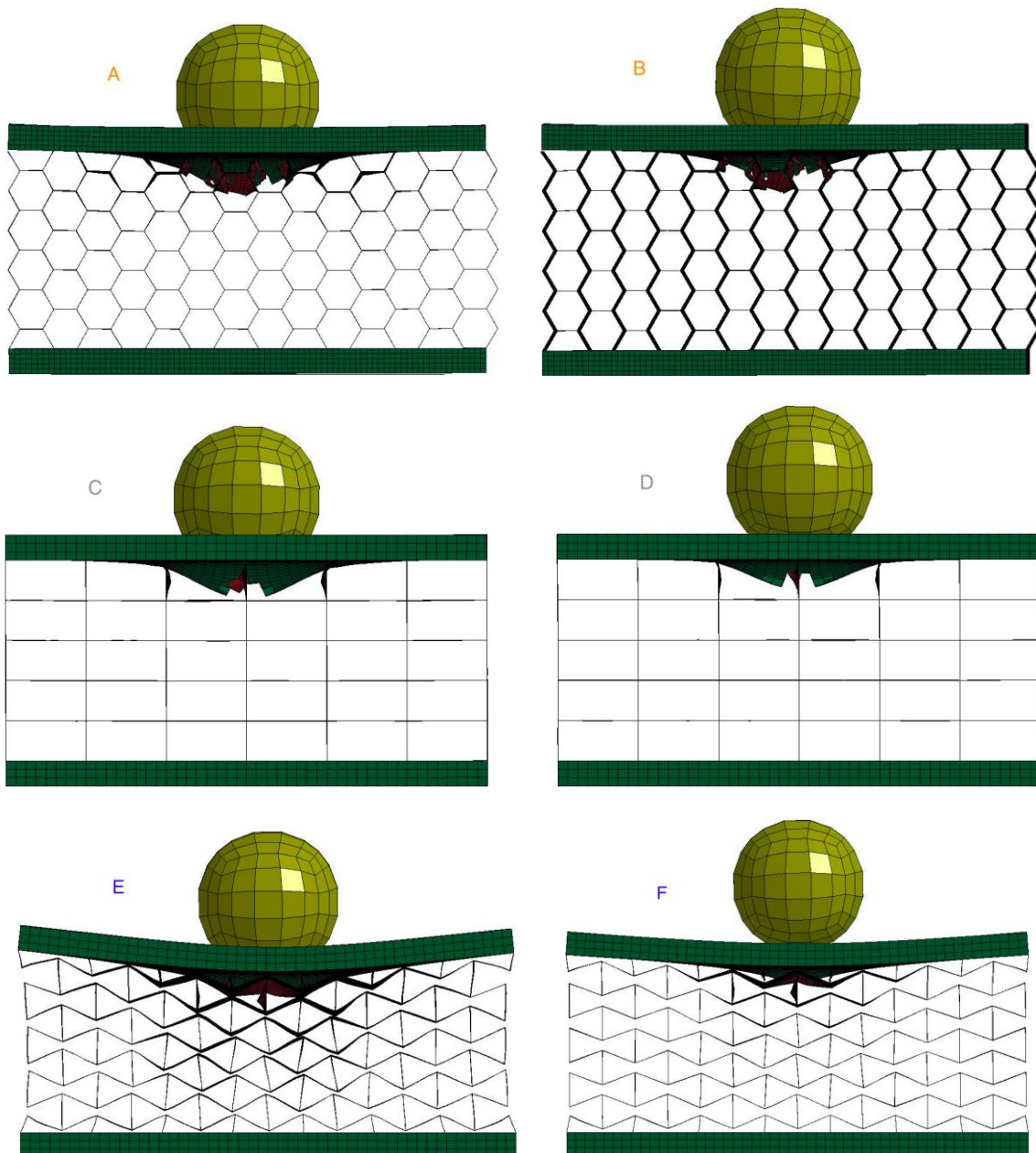


Figura 5.21 - Distintos momentos dos ensaios numéricos de impacto realizados em provetes de PLA na 1ª série, definidos na figura anterior.

As deformações apresentadas na Figura 5.21 demonstram de forma clara a grande diferença entre as distintas geometrias. Observando a placa superior da geometria auxética (*E* e *F*), nota-se que esta se deforma na sua totalidade, não sofrendo uma deformação excessiva no local do impacto. Este facto deve-se à elasticidade da estrutura, e faz com que a dissipação de energia ocorra através de uma área muito maior à do impacto. Contrariamente, as placas superiores das duas outras geometrias (*A* a *D*) apenas sofrem deformação no local de impacto. Assim, essa deformação local é muito superior, e causa danos bastante mais extensos. A energia foca-se no local de impacto, não sendo dissipada pelo resto da estrutura. De igual modo, a deformação residual torna-se

bastante superior, visto que a geometria, ao não se deformar, não possui a capacidade elástica de recuperar o deslocamento imposto.

As conclusões obtidas acima encontram-se expressas na Figura 5.22. A capacidade de recuperação elástica foi bastante maior nos auxéticos, especialmente para maiores solicitações. Esta diferença foi mais notória no caso do PLA. No entanto, foi o PETG a apresentar as maiores deformações, para todos os casos estudados.

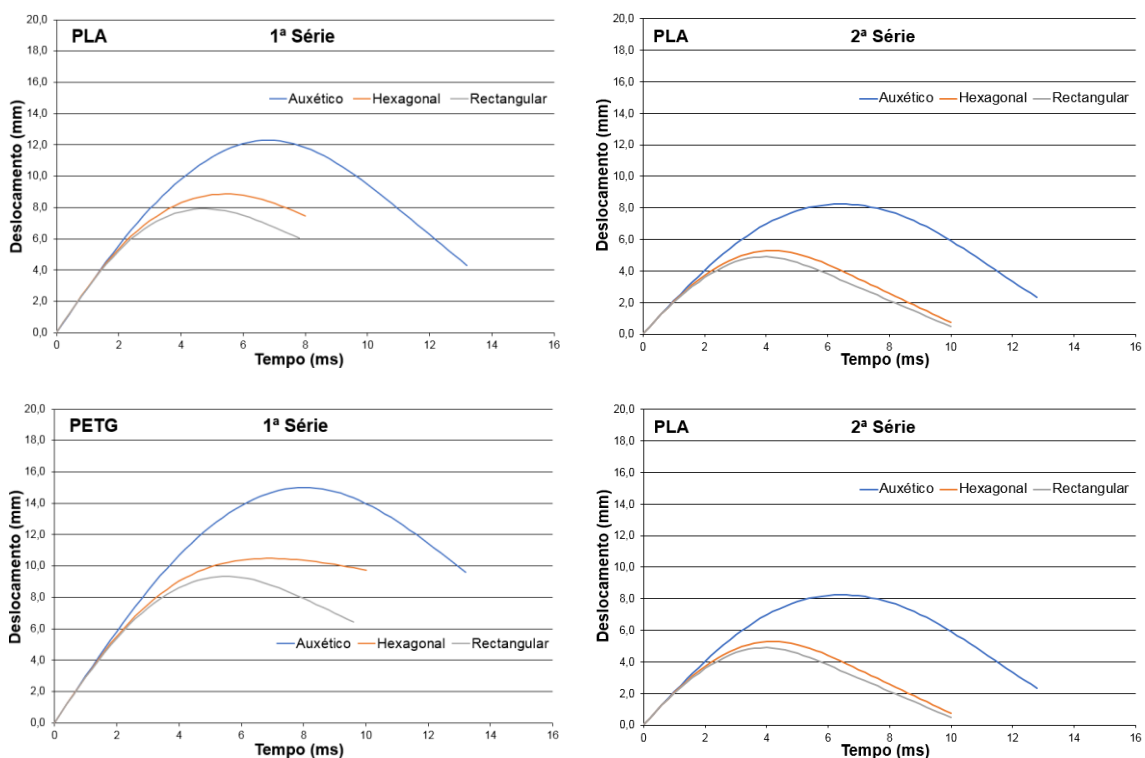


Figura 5.22 - Comparação do deslocamento vertical na zona de impacto de cada geometria ao longo do tempo do ensaio numérico.

5.3.5 Comparação dos materiais

Todas as análises apresentadas seguidamente, tanto de força como de deslocamento, apresentam a mesma conclusão: o PETG apresenta um comportamento mais flexível, absorvendo energia de forma mais gradual (Figura 5.23) devido a um deslocamento vertical superior. O seu senão é o facto de não possuir a mesma capacidade de restituição elástica do PLA, apresentando danos residuais superiores (Figura 5.24). Estas conclusões são análogas às apresentadas para os ensaios experimentais, estando aprofundadas nesse mesmo capítulo.

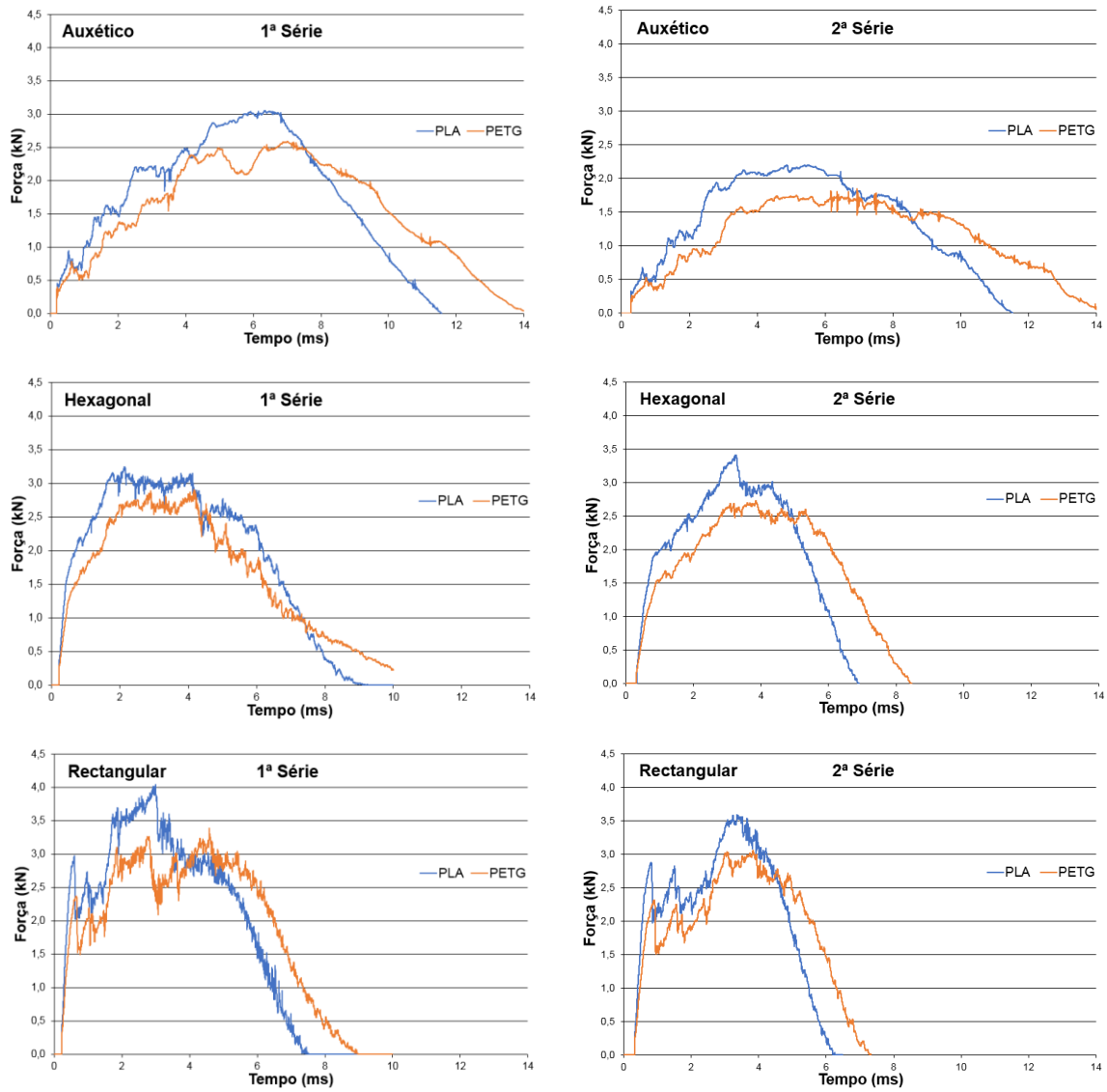


Figura 5.23 - Comparação da força actuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio numérico.

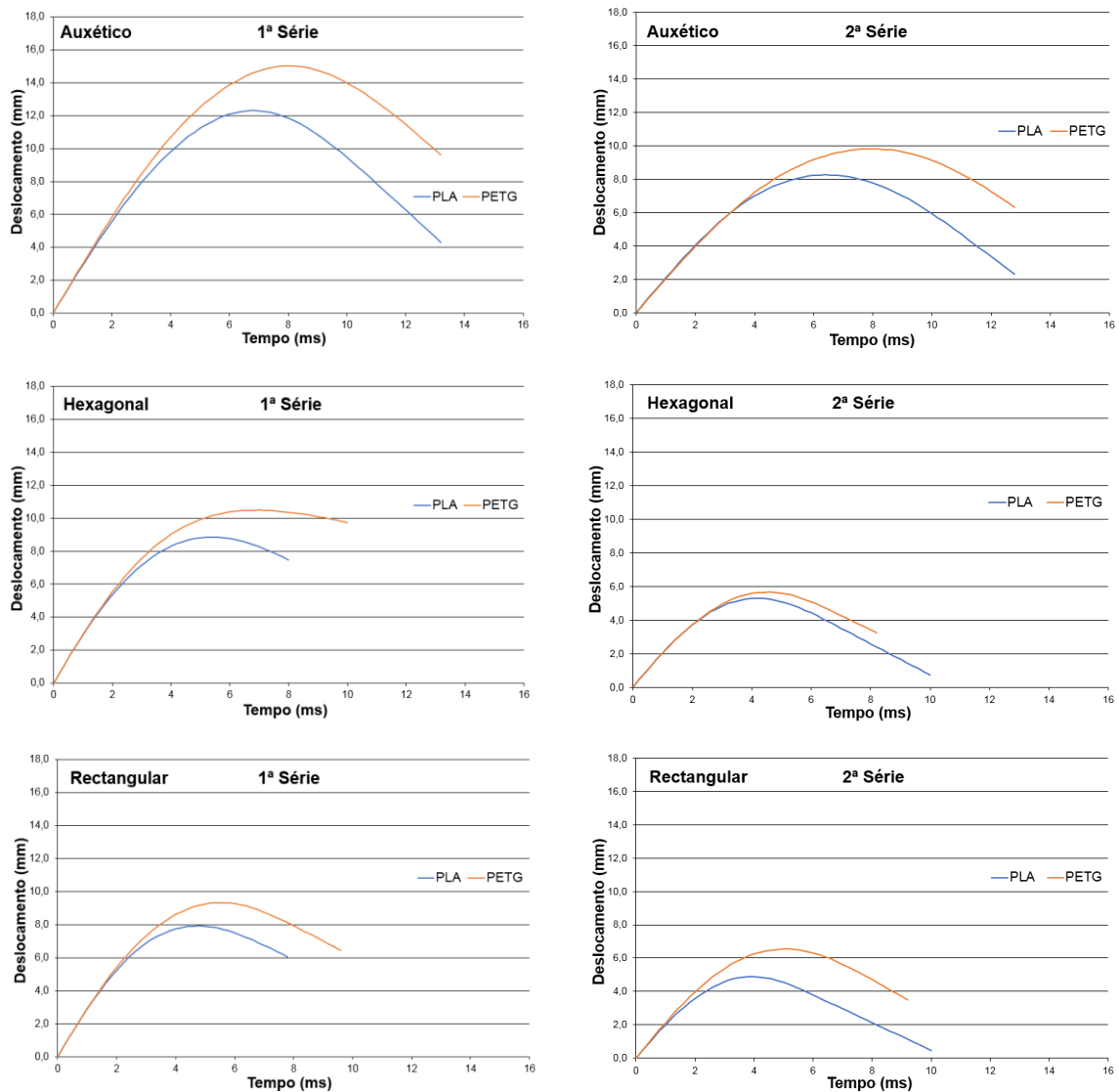


Figura 5.24 – Comparação do deslocamento vertical de cada material ao longo do tempo do ensaio numérico.

5.3.6 Coeficiente de Poisson

O software LS-DYNA, fornecendo todos os dados de deslocamento de cada elemento, permite igualmente a obtenção do coeficiente de Poisson de cada estrutura, sendo interessante a sua comparação com os resultados obtidos experimentalmente. A análise foi igualmente realizada no final da fase elástica, antes de se verificarem deformações nas paredes celulares que adulteram os valores de deslocamento vertical. Os valores de deslocamento horizontal foram obtidos selecionando um elemento da parede externa do provete, a meio da altura do mesmo. Esse foi o local de maior deformação. Esse valor foi duplicado, uma vez que o deslocamento vertical causa uma deformação lateral igual, de sentido oposto, nos dois lados do provete. Considerou-se positivo o sentido de deslocamento oposto ao interior do provete.

Tabela 5.5 - Valores do coeficiente de Poisson de cada geometria distinta, obtidos numericamente e experimentalmente.

	Hexagonal	Rectangular	Auxético
Deslocamento vertical [mm]	1,42	0,94	7,95
Deslocamento horizontal [mm]	0,31	0,17	-3,24
Coeficiente de Poisson numérico [ν]	0,22	0,18	-0,41
Coeficiente de Poisson experimental [ν]	0,19	-	-0,38

O valor obtido numericamente foi comparável com o experimental, não existindo uma grande diferença. Sendo que o material da estrutura numérica apresenta um modelo constitutivo isotrópico, esta possui melhores condições para se deformar elasticamente, e conseqüentemente resultar num coeficiente de Poisson menor. Aqui poderá estar uma explicação para o desempenho ligeiramente superior da estrutura modulada.

5.4 Conclusões

A melhor forma de retirar conclusões relativas aos ensaios numéricos, passa por compará-los directamente com os experimentais. Após este estudo comparativo concluiu-se que os resultados obtidos numericamente apresentaram uma boa aproximação, de forma geral, do comportamento real das estruturas. A maioria dos provetes apresentou uma diferença máxima de cerca de 10%, sendo um valor considerado aceitável.

Alguns casos apresentaram um erro bastante superior. A explicação mais plausível para este facto é a diferença de comportamento da estrutura impressa, e da estrutura modelada. Sendo a modelada uma estrutura isotrópica, não replica de forma exacta o comportamento da real, que possui uma maior resistência numas direcções, e menor noutras.

A geometria rectangular apresentou-se como uma alternativa à hexagonal, tendo ainda assim apresentado piores resultados de resposta à solicitação imposta, embora similares. Trata-se, portanto, de uma estrutura mais simples, que poderá ser utilizada caso isso seja um factor importante, mas sendo mais vantajosa a utilização da geometria hexagonal



6 Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões:

Os resultados obtidos através dos ensaios experimentais e numéricos confirmaram a tese inicial deste trabalho: uma geometria auxética, solicitada nestas condições, possui uma capacidade superior de mitigação de impactos, quando comparada com uma mais tradicional, hexagonal ou rectangular. Independentemente do material utilizado, os provetes auxéticos apresentaram valores significativamente mais favoráveis no que toca a absorção de energia e deformação física, e consequente protecção das estruturas adjacentes. Os ensaios numéricos realizados obtiveram resultados satisfatórios, sendo um método viável de estudo e teste de novas geometrias inovadoras que possam apresentar resultados ainda mais interessantes.

Confirmou-se que o PETG é um material a ter em conta para o desenvolvimento e impressão de protótipos por este método. Visto ser mais dúctil que o PLA, embora ligeiramente menos resistente, demonstrou ser mais eficaz na mitigação das forças produzidas pelos impactos, especialmente de baixa energia.

As geometrias com coeficiente de Poisson positivo mostraram-se mais eficazes na dissipação de energia, devido a uma maior plastificação e rotura de material. Este facto traduz uma menor energia de ressalto do impactor. Embora esse factor possa ser relevante, as características de absorção da energia pela totalidade da estrutura apresentadas pela geometria auxética, assim como o seu aumento gradual de resistência, apresentam uma grande vantagem no padrão mais importante: a protecção das estruturas a que se encontra acoplado.

6.2 Desenvolvimentos futuros:

Existem variadas formas de procurar melhorar o comportamento estrutural dos provetes. A placa superior, que recebe os impactos, revelou-se pouco resistente ao ser solicitada, não sendo capaz de descarregar toda a energia recebida para a geometria interna de forma eficaz. Caso tivesse sido possível, os provetes poderiam tirar mais partido das suas características geométricas elásticas para a absorção de energia, atrasando os efeitos da plastificação e quebra de células. Em futuros

estudos, este caso poderá ser colmatado através da introdução de um elemento mais sólido na placa superior, tal como uma chapa de aço, por exemplo.

A introdução de *Smart Materials*, tais como os SMA (*Shape Memory Alloys*) também poderá ser uma temática muito interessante. Poderão ser utilizados pequenos cabos de ligas metálicas com características superelásticas, que assumam a sua forma inicial após a deformação imposta pelo impacto. Estes poderão ser introduzidos na placa superior, formando uma malha que poderá permitir uma absorção mais eficaz de energia, assim como uma extensão de danos bastante inferior.

Referências Bibliográficas

- Alderson, A., Alderson, K. (2006). *Auxetic materials*. Proc. IMechE Vol. 221 Part G: J. Aerospace Engineering.
- Behalek, L., Lenfeld, P., Seidl, M., Bobek, J., Ausperger, A. (2012). *Friction properties of composites with natural fibres, synthetic and biodegradable polymer matrix*. NanoCon 2012.
- Elipe, J., Lantada, A. (2012). *Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering*. Smart Materials and Structures 21, 105004.
- Evans, K. (1991). *Auxetic polymers: a new range of materials*. Endeavour, New Series, Volume 15, No. 4.
- Evans, K., Alderson, A. (2000). *Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking!* Advanced Materials, 12 No. 9.
- Garrido, M., Teixeira, R., Correia, J., Sutherland, L. (2019). *Quasi-static indentation and impact in glass-fibre reinforced polymer sandwich panels for civil and ocean engineering applications*. Journal of Sandwich Structures and Materials.
- Gatt, R., Mizzi, L., Azzopardi, J., Azzopardi, K., Attard, D., Casha, A., Briffa, J., Grima, J. (2015). *Hierarchical auxetic mechanical metamaterials*. Scientific Reports, 5:8395.
- Imbalzano, G., Linforth, S., Ngo, T., Lee, P., Tran, P. (2017). *Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs*. Composite Structures.
- Kramberger, J., Necemer, B., Glodez, S. (2019). *Assessing the cracking behavior of auxetic cellular structures by using both a numerical and an experimental approach*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 101, 17-24.
- Kolken, H., Zadpoor, A. (2017). *Auxetic mechanical metamaterials*. RSC Advances, 7, 5111.
- Lakes, R. (1991). *Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects*. Journal of Materials Science 26, 2287-2292.
- Lakes, R. (1993). *Advances in negative Poisson's ratio materials*. Advanced Materials, 5, No. 4.
- Lan, X., Feng, S., Zhou, T. (2019). *A comparative study of blast resistance of cylindrical sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores*. Aerospace Science and Technology, 37-47.

- Lee, J., Singer, J., Thomas, E. (2012). *Micro/Nanostructured Mechanical Metamaterials*. *Advanced Materials* 24, 4782-4810.
- Li, T., Chen, Y., Hu, X., Li, Y., Wang, L. (2018). *Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties*. *Materials and Design* 142, 247-258.
- Liu, Q. (2006). *Literature review: Materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence*. DSTO-GD-0472.
- Liu, Y., Zhang, X. (2010). *Metamaterials: a new frontier of science and technology*. *Chem. Soc. Rev.* 40, 2494-2507.
- Magalhães, R. (2015). *Desenvolvimento de materiais auxéticos para aplicações estruturais*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Novak, N., Starcevic, L., Vesenjal, M., Zoran, R. (2018). *Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core*. *Composite Structures* 210, 167-178.
- Qi, C., Remennikov, A., Pei, L., Yang, S., Yu, Z., Ngo, T. (2017). *Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations*. *Composite Structures* 180, 161-178.
- Rafsanjani, A., Damiano, P. (2016). *Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs*. *Extreme Mechanics Letters* 9, 291-296.
- Rebelo, H. B., Gregório, A., Rosa P. A. R., Cismaşiu, C. (2019). *Quasi-static and high strain rate uniaxial response of 3D printed PLA specimens*. *Additive Manufacturing* 2019. Manuscript in preparation.
- Ren, X., Das, R., Tran, P., Ngo, T., Xie, Y. (2018). *Auxetic metamaterials and structures: a review*. *Smart Materials and Structures* 27, 023001.
- Sarbinowski, F., Labudzki, R., Talar, R., Patalas, A. (2018). *A numerical and experimental study of the energy absorption capacity of auxetic structures manufactured with additive technology*. *Mechanical Design and Prototyping*.
- Sarvestani, H., Akbarzadeh, A., Niknam, H., Hermenean, K. (2018). *3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance*. *Composite Structures*.
- Silverberg, J., Evans, A., McLeod, L., Hayward, R., Hull, T., Santangelo, C., Cohen, I. (2014). *Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials*. *Science*, 345-6197.

- Stavric, M., Wiltsche, A. (2019). *Geometrical Elaboration of Auxetic Structures*. Nexus Network Journal, 21:79-90.
- Underhill, R. (2014). *Defense applications of auxetic materials*. DSIAC Journal, 1-1.
- Wang, T., Wang, L., Ma, Z., Hulbert, G. (2018). *Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method*. Materials and Design 160, 284-293.
- Wu, C., Li, L., Thornton, C. (2005). *Energy dissipation during normal impact of elastic and elastic-plastic spheres*. International Journal of Impact Engineering 32, 593,604.
- Yang, D., Huang, F. (2002). *Geometric effects on micropolar elastic honeycomb structure with negative Poisson's ratio using the finite element method*. Finite Elements in Analysis and Design 39, 187-205.
- Yang, W., Li, Z., Shi, W., Xie, B., Yang, M. (2004). *Review On auxetic materials*. Journal of Materials Science 39, 3269-3279.
- Yunyao, J., Yaning, L. (2018). *3D Printed auxetic mechanical metamaterial with chiral cells and re-entrant cores*. Scientific Reports, 8:2397.
- Zhou, L., Zeng, J., Jiang, L., Hu, H. (2017). *Low-velocity impact properties of 3D auxetic textile composite*. J Mater Sci 53:3899-3914.