



Universidade de Aveiro
2021

**Tiago Domingos dos
Santos Pereira**

**Desenvolvimento de capacete de ciclismo com
função de absorção de energia utilizando fabrico
aditivo**



**Tiago Domingos dos
Santos Pereira**

**Desenvolvimento de capacete de ciclismo com
função de absorção de energia utilizando fabrico
aditivo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos UIDB/00481/2020, UIDP/00481/2020 e POCI-01-0145-FEDER-032486 - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; e CENTRO-01-0145 FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

O júri / The jury

Presidente / President

Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa
Professor Auxiliar c/ Agregação da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Mário Augusto Pires Vaz
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos / Acknowledgements

Ao Professor Doutor António Ramos e ao Professor Doutor Carlos Relvas, professores e orientadores, pela disponibilidade, orientação e contribuição de conhecimentos vitais à realização deste documento.

Ao Engenheiro António Festas, por toda a dedicação e troca de conhecimentos que espero levar tanto a nível profissional como a nível pessoal.

Aos Engenheiros e Futuros Engenheiros que me acompanharam e contribuíram no sucesso do meu percurso académico.

Dirijo um agradecimento especial à minha família pelo carinho, apoio, motivação e acompanhamento numa etapa fundamental da minha vida profissional.

Palavras-chave

Tecnologias de fabrico aditivo; FDM; Estruturas *Lattice*; Absorção de energia; Capacete

Resumo

A par da evolução das tecnologias e dos materiais utilizados em fabrico aditivo (FA), aumentaram as possibilidades de produção de componentes que apresentam geometrias complexas, o que por sua vez, veio permitir alterar o design e os elementos constituintes de um produto de forma drástica.

Desta feita, a constante evolução da tecnologia aditiva com recurso a materiais poliméricos, visa proporcionar uma maior liberdade de desenvolvimento dos componentes relativamente aos processos de fabrico subtrativos, permitindo assim, um aumento de desempenho em áreas distintas da engenharia. A presente dissertação tem como objetivo explorar a possibilidade de utilização de modelos funcionais produzidos com recurso a *Fused Deposition Modelling* (FDM), direcionados para o desenvolvimento de estruturas cuja função primária se foca na absorção de energia de impacto, nomeadamente, no âmbito da segurança rodoviária passiva em capacetes de ciclismo.

O *Expanded Polystyrene* (EPS) define-se como sendo o material mais utilizado no fabrico de capacetes, apresentando boa resistência mecânica aliada a densidades reduzidas, o que o torna ideal para aplicações cujo objetivo é a absorção de energia.

Numa fase inicial, o trabalho centrou-se no estudo de estruturas complexas, capazes de competir face ao EPS, pelo que, foram desenvolvidas 4 estruturas com diferentes características a fim de verificar um equilíbrio existente entre a densidade e a energia absorvida, em dois materiais poliméricos de naturezas distintas.

Com recurso a testes quasi-estáticos, foi possível constatar que a estrutura "Círculos" perdurou com as melhores características de absorção de energia. Todavia, devido a fatores ergonómicos, revelou-se inexequível para aplicação do modelo em estudo. Por conseguinte, a estrutura "Diamante Hexagonal" assumiu-se como a alternativa a adotar.

Numa segunda fase, pretendeu-se desenvolver um modelo de capacete rodoviário simplificado por impressão 3D, constituído pelo material e estrutura de melhor desempenho. O modelo de capacete na sua versão final, obtido em *tough* PLA, apresentou uma massa total de 244.84g.

A fase final foi constituída pela análise dos resultados obtidos relativamente à aceleração do centro de gravidade do modelo da cabeça e aos valores de *Head Injury Criterion* (HIC), sendo verificado se os parâmetros cumpriram com os limites estabelecidos pela norma europeia.

Keywords

Additive manufacturing technologies; FDM; Lattice structures; Energy absorption; Helmet

Abstract

Along with the evolution of the technologies and materials used in additive manufacturing (AM), the possibilities of producing components with complex geometries have increased, which in turn has allowed the design and the constituent elements of a product to be changed drastically.

Thus, the constant evolution of additive technology using polymeric materials, aims to provide greater freedom in the development of components in relation to subtractive manufacturing processes, thus allowing an increase in performance in different fields of engineering.

This dissertation aims to explore the possibility of using functional models produced using *Fused Deposition Modelling* (FDM), directed to the development of structures whose primary function is focused on the absorption of impact energy, namely, in the field of passive road safety in cycling helmets. *Expanded Polystyrene* (EPS) is defined as the most commonly used material in the manufacture of helmets, with good mechanical strength and low density, which makes it ideal for applications whose goal is energy absorption. In an initial phase, the work was focused on the study of complex structures, capable of competing against EPS, so 4 structures with different characteristics were developed in order to evaluate an existing balance between density and absorbed energy, in two polymeric materials of different natures.

Using quasi-static tests, it was possible to verify that the "Círculos" structure had the best energy absorption characteristics. However, due to ergonomic factors, it proved to be unfeasible for the application of the model under study. Therefore, the "Diamante Hexagonal" structure was assumed as the alternative to be adopted.

In a second phase, a simplified road helmet model was developed by 3D printing, consisting of the best performing material and structure. The helmet model in its final version, obtained in *tough* PLA, had a total mass of 244.84g.

The final phase consisted in analysing the results obtained regarding the acceleration of the center of gravity of the head model and the *Head Injury Criterion* (HIC) values, being verified if the parameters comply with the limits established by the european standard.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do documento	2
2	Revisão do Estado da Arte	3
2.1	Fabrico Aditivo	3
2.1.1	Etapas fundamentais	4
2.2	Processos de fabrico aditivo	5
2.2.1	Binder Jetting (BJ)	6
2.2.2	Direct Energy Deposition (DED)	7
2.2.3	Material Extrusion (ME)	7
2.2.4	Material Jetting (MJ)	8
2.2.5	Powder Bed Fusion (PBF)	9
2.2.6	Sheet Lamination (SL)	9
2.2.7	VAT Photopolymerization (VP)	10
2.3	Design para fabrico aditivo	10
2.3.1	Design generativo	11
2.3.2	Otimização topológica (OT)	11
2.3.3	Estruturas <i>lattice</i> (EL)	12
3	Estudo de objeto de atuação	15
3.1	Tipologia de capacetes de ciclismo	16
3.2	Estrutura e elementos constituintes	17
3.3	Aplicação de fabrico aditivo em capacetes	19
3.4	Norma de regulamentação capacetes, EN1078	20
3.4.1	Cabeça-manequim	22
4	Estudo estruturas a integrar o capacete	23
4.1	Espumas	23
4.2	Metodologia de Testes Experimentais	24
4.3	Estudo geométrico	25
4.3.1	Materiais	26
4.4	Estruturas desenvolvidas	27
4.4.1	Estrutura 1: Círculos	27
4.4.2	Estrutura 2: Diamante Hexagonal	28

4.4.3	Estrutura 3: Mola	28
4.4.4	Estrutura 4: <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	29
4.5	Resultados experimentais das estruturas	30
4.5.1	Estrutura 1: Círculos	30
4.5.2	Estrutura 2: Diamante Hexagonal	31
4.5.3	Estrutura 3: Mola	32
4.5.4	Estrutura 4: <i>BCC</i>	33
4.6	Evoluções realizadas	34
4.6.1	Estrutura 1: Círculos	34
4.6.2	Estrutura 2: Diamante Hexagonal	36
5	Projeto para fabrico aditivo	39
5.1	Levantamento de forma	39
5.2	Aplicação da estrutura "Diamante Hexagonal"	42
5.3	Estudo das orientações de fabrico	43
5.4	Fabrico aditivo	44
6	Ensaio de acordo com norma EN 1078	45
6.1	Resultados do teste de impacto	47
7	Discussões gerais	51
8	Conclusões e Trabalhos futuros	53
8.1	Conclusões	53
8.2	Trabalhos futuros	54

Lista de Tabelas

3.1	Características das formas de cabeça utilizadas em ensaios de impacto, de acordo com a norma [1]	22
4.1	Resultados de testes de compressão em EPS até densificação	26
4.2	Propriedades dos filamentos utilizados neste caso de estudo	26
4.3	Resumo da densidade das diferentes estruturas apresentadas	30
4.4	Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Círculos"	31
4.5	Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Diamante Hexagonal"	32
4.6	Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Mola"	33
4.7	Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "BCC"	34
4.8	Dados resultantes de testes realizados à versão otimizada da estrutura "Círculos"	36
4.9	Dados resultantes de testes realizados à versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal"	36
4.10	Tabela resumo dos resultados obtidos dos ensaios realizados à versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal"	37
5.1	Definição de parâmetros de impressão 3D	43
6.1	Valores de HIC e de AIS correspondentes (intervalo de 15ms) [2]	47
6.2	Valores de picos de aceleração e HIC dos ensaios experimentais	48

Lista de Figuras

2.1	Ilustração das etapas de construção de um modelo por impressão 3D [3]	5
2.2	7 categorias de tecnologias de fabrico aditivo de acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015 [4]	6
2.3	Esquemática ilustrativa do processo BJ [5]	6
2.4	Ilustração das diferentes camadas em produto obtido por FDM [5]	7
2.5	Esquemática ilustrativa do processo MJ [5]	8
2.6	Esquemática ilustrativa do processo PBF [5]	9
2.7	Esquemática ilustrativa do processo SLA [5]	10
2.8	Exemplo de componente obtido por Otimização Topológica (https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/02/3d-printed-mechanics/)	12
2.9	Categorias de materiais celulares [6]	13
3.1	Campanha sensibilização promovida pelo ACP	15
3.2	Exemplo capacete estrada da marca <i>Rudy</i> (https://www.rudyproject.com/pt/pt-pt/products/helmets/venger)	16
3.3	Exemplo capacete montanha da marca <i>Scott</i> (https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-stego-plus-ce-helmet)	16
3.4	Exemplo capacete cidadão da marca <i>Scott</i> (https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-jibe-ce-helmet)	17
3.5	Exemplo capacete de criança da marca <i>Scott</i> (https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-spunto-kid-ce-helmet)	17
3.6	Ilustração do sistema de estabilização desenvolvido pela empresa <i>Boa Technology Inc</i> (https://themtblab.com/2018/07/boa-technology-and-mips-partner-for-improved-helmet-fit-and-protection.html)	18
3.7	Ilustração do funcionamento da tecnologia MIPS (https://bttlobo.com/o-teu-cerebro-esta-mesmo-protegido-com-o-teu-capacete-a-mips-explica/)	18
3.8	Ilustração da tecnologia <i>WaveCel</i> (https://road.cc/content/review/265229-bontrager-xxx-wavecel-helmet)	19
3.9	Capacete desenvolvido pela <i>HEXR</i> com uma estrutura alveolar hexagonal (https://hexr.com/blogs/all/how-a-hexr-is-made-1)	20
3.10	Mecanismo de ensaios de impacto	21
4.1	Curva de tensão-deformação de teste à compressão de uma espuma EPS	23
4.2	Comportamento compressivo das amostras de EPS com diferentes densidades	25
4.3	Representação CAD da estrutura "Círculos"	27
4.4	Representação CAD da estrutura "Diamante Hexagonal"	28

4.5	Representação CAD da estrutura "Mola"	29
4.6	Representação CAD da estrutura "BCC"	29
4.7	Gráficos tensão-deformação da estrutura "Círculos" nos diferentes materiais testados	30
4.8	Resultado do teste de compressão para o material <i>nylon</i>	31
4.9	Gráficos tensão-deformação da estrutura "Diamante Hexagonal" nos diferentes materiais testados	32
4.10	Gráficos tensão-deformação da estrutura "Mola" nos diferentes materiais testados	32
4.11	Gráficos tensão-deformação da estrutura "BCC" nos diferentes materiais testados	33
4.12	Ilustração das alterações realizadas na estrutura "Círculos"	34
4.13	Apresentação da versão otimizada da estrutura "Círculos"	35
4.14	Gráficos tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Círculos"	35
4.15	Gráfico tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal" para o material <i>nylon</i>	37
4.16	Gráfico tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal" para o material <i>tough PLA</i>	37
5.1	Modelo base no material EPS	39
5.2	<i>Scanner</i> com feixe de luz estruturada, <i>Calibry</i> (https://thor3dscanner.com/en/products/)	40
5.3	Ilustração da malha obtida do levantamento de forma	40
5.4	Ilustração os <i>sketches</i> extraídos da malha	41
5.5	Ilustração das superfícies geradas com recurso ao levantamento de forma	41
5.6	Apresentação do modelo completo obtido por superfícies	42
5.7	Apresentação da incorporação da estrutura "Diamante Hexagonal" no modelo digital do capacete	43
5.8	Ilustração do estudo das orientações realizado com recurso ao <i>software Ultimaker Cura</i>	44
5.9	Apresentação do modelo físico do produto final	44
6.1	Ilustração do mecanismo utilizado para realização dos testes experimentais	46
6.2	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo do ensaio realizado ao capacete obtido em EPS	47
6.3	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo do ensaio realizado ao capacete obtido em <i>tough PLA</i>	48
6.4	Apresentação do estado da estrutura dedicada à absorção de energia após teste de impacto	49

Lista de Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3DP	<i>3D inkjet</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ACP	Automóvel Clube de Portugal
AIS	<i>Abbreviated Injury Scale</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCC	<i>Body Centered Cubic</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEN	Comité Europeu de Normalização
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DfAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DoD	<i>Drop-on-Demand</i>
DpFA	Design para Fabrico Aditivo
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
EL	Estruturas <i>Lattice</i>
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
HIC	<i>Head Injury Criterion</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
ME	<i>Material Extrusion</i>
MIPS	<i>Multi-directional Impact Protection System</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MJ	<i>Material Jetting</i>
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
OT	Otimização Topológica
PA	<i>Polyamide</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PLA	<i>Polylactide Acid</i>
PSP	Polícia de Segurança Pública
SL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
UV	Ultravioleta
VP	<i>VAT Photopolymerisation</i>
WAAM	<i>Welding Arc Additive Manufacturing</i>

Lista de Unidades

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus <i>Celsius</i>
cm^3	Centímetro cúbico
G	Constante gravitacional
g	Gramma
J	Joule
MPa	Megapascal
m/s	Metro por segundo
mm	Milímetro
mm^3	Milímetro cúbico
mm/min	Milímetro por minuto
ms	Milisegundo
min	Minuto
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
s	Segundo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo de várias décadas a indústria foi dominada pelo fabrico subtrativo, isto é, o processo de produção e fabrico de componentes era efetuado com recurso a processos de maquinagem, onde ferramentas abrasivas ou de corte eram utilizadas para remoção de material ou conformação. Assim sendo, partindo de um bloco inicial era possível obter a geometria desejada.

Com a ascensão do FA em termos de tecnologias e materiais a utilizar paralelamente, as possibilidades de fabrico de peças com geometrias complexas permitem variar a rigidez e a sua estrutura interna. Esta capacidade de fabrico tem permitido a utilização destas tecnologias em desenvolvimento de peças por forma a reduzir a massa e a aumentar a sua *performance* em diferentes áreas de produtos. As tecnologias de FA com a utilização de materiais poliméricos podem apresentar mais valias em fabrico de peças com função de absorção de energia, nomeadamente energia aquando do impacto.

O FA está a evoluir a um ritmo exponencial e tem o potencial de revolucionar a forma como os produtos são concebidos e fabricados. Todavia, existe uma ampla variedade de processos, cada um com as suas próprias vantagens e desvantagens. Além de que, cada processo tem os seus detalhes específicos e, quando combinado com as características distintas do material, representa um problema desafiante. Assim, a previsão do comportamento mecânico de estruturas obtidas por FA é um desafio permanente devido a defeitos, incertezas na caracterização do material e métodos de verificação.

De um ponto de vista global, este projeto visa estudar o comportamento mecânico de elementos estruturais projetados para a proteção contra impacto em capacetes de ciclismo. Os elementos desenvolvidos têm como função primária a absorção de energia, e, por conseguinte, aumentar a proteção aos seus utilizadores. Posto isto, a vertente de desenvolvimento desta dissertação prende-se com a análise da viabilidade de utilização de materiais poliméricos nesses elementos. Para o efeito, foi realizado um estudo de estruturas, de forma a perceber qual a melhor geometria para absorção de impacto, e posteriormente proceder à produção do capacete de ciclismo por FDM.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho visam estudar a possibilidade da utilização de FA em produtos cuja função se prende com a absorção de energia aquando do impacto ou em serviço.

Objetiva-se o desenvolvimento e construção de um capacete de ciclismo funcional, com recurso a FA, por forma a estudar a geometria com melhor desempenho na absorção de energia. Uma vez fabricado, pretende-se que o mesmo cumpra com os requisitos da norma reguladora em vigor.

1.3 Estrutura do documento

A fim de fornecer ao leitor um guia de leitura prático, é elaborado, de seguida, a estruturação do documento onde são descritos resumidamente os conteúdos de cada capítulo. A presente dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos.

O primeiro capítulo traduz-se numa parte introdutória, ao longo da qual se realiza a contextualização do tema, bem como a especificação dos objetivos definidos na presente dissertação.

O segundo capítulo apresenta o enquadramento teórico do estudo. Analisa, com base na revisão bibliográfica, o conceito de FA, respetivos processos e propriedades específicas de cada um. São ainda apresentados alguns conceitos de design relacionados com a produção aditiva.

No terceiro capítulo é justificada a escolha do objeto de estudo. Seguida de uma análise de mercado de diferentes tipos de capacetes e tecnologias revolucionárias. Por fim, é descrita a norma reguladora que abrange o objeto de estudo.

O quarto capítulo descreve os procedimentos e metodologias utilizadas no desenvolvimento de estruturas com função de absorção de energia.

O quinto capítulo é dedicado à realização do levantamento de forma do modelo físico e todo o processo associado até à obtenção do capacete em material polimérico.

O sexto capítulo é constituído pelos ensaios realizados de acordo com a norma EN 1078. São também apresentados os resultados dos testes de impacto, seguidos de uma análise aprofundada.

No sétimo capítulo são discutidos os resultados obtidos e a respetiva comparação com o modelo homólogo já comercializado.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões aliadas a propostas de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

2.1 Fabrico Aditivo

Fabrico Aditivo (FA), habitualmente conhecido como impressão 3D, é definido pela ISO/ASTM 52903:2020, resultado de uma parceria realizada com *International Organization for Standardization* (ISO) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM), como sendo “um processo de união de material, normalmente por deposição camada pós camada, possibilitando a obtenção de modelos virtuais projetados utilizando design auxiliado por computador *Computer Aided Design* (CAD) [4]. Este principal conceito é o que o distingue dos processos considerados até agora convencionais.

Surgindo no mercado em meados da década de 1980 e inicialmente divulgados com a criação de protótipos e modelos de visualização. Recentemente, os avanços na tecnologia de equipamentos e o surgimento de novos materiais expandiram o fabrico aditivo para outras aplicações, como a fabricação de moldes, ferramentas e peças finais [3].

A rápida proliferação de uma ampla variedade de tecnologias associadas ao *Additive Manufacturing* (AM) é impulsionada pelo aumento da variedade de materiais, máquinas de baixo custo resultando na falta de um conjunto abrangente de princípios de design, diretrizes de fabricação e padronização de melhores práticas [7].

Embora esta tecnologia não possa garantir a qualidade da peça e escalabilidade dos métodos de produção atuais, esperamos que essa lacuna reduza significativamente no futuro próximo. Do ponto de vista da indústria, as tecnologias AM têm potencial por impactar significativamente os modelos de produção tradicionais em termos de maquinário industrial, processos de montagem e fornecimento correntes [7].

Em contraste com o fabrico subtrativo, o FA é moroso e sequencial [3], tornando-se mais adequado para produção de séries reduzidas particularmente em peças de geometria mais complexa [8]. Este método de produção veio-se destacar principalmente pelas seguintes características:

Flexibilidade de Design. O FA veio distinguir-se pela sua fabricação por camadas e veio permitir a criação de forma geométricas complexas. Isto contrasta com os processos de fabrico ditos convencionais que restringem a liberdade de projeto devido à

necessidade de diversas ferramentas, representando um dos fatores que impossibilita o desenvolvimento de produtos atualmente [9].

Custo da complexidade geométrica. Em técnicas de FA, esta complexidade tem custos devido ao aumento do tempo de produção, contudo trata-se de custos muito inferiores comparativamente a processos de fabrico tradicionais caso seja necessário adição de novas ferramentas ou produção de novas peças. A produção por camadas permite que o interior das peças seja sempre acessível tornando possível a integração de múltiplos domínios de desenho para realizar várias funções [10]. Por exemplo, a possibilidade de incorporação de canais de refrigeração dentro das paredes do bloco de um motor, otimizando a forma como este é mantido a temperaturas mais baixas.

Precisão dimensional. A precisão dimensional determina a derivação do modelo físico quando comparado como o modelo digital. Quando realizados projetos para maquinaria tradicional, é aplicado toleranciamento geométrico geral e específico baseado em normas estipuladas (Normas ISO, por exemplo) para garantir qualidade do produto final. No entanto, a distinção entre precisão e resolução não teve grande impacto no início do desenvolvimento por FA pois este era destinado à elaboração de protótipos [7]. Com a evolução das tecnologias e o aparecimento de maquinaria com maior precisão, existe uma maior preocupação em estabelecer normas de precisão dimensional para peças produzidas por fabrico aditivo. Alguns estudos propõem precisão dimensional como o caso proposto por Decker [11].

Consolidação de componentes. Como previamente mencionado, a liberdade de design e levantamento de restrições geométricas possibilita a junção de vários componentes numa peça única. Eliminando custos de montagem e redução de custos de inventário. Elementos de ligação e possíveis zonas críticas a nível estrutural são reduzido, o que aumenta a funcionalidade e melhora o desempenho [12].

Eficiência tempo/custos de produção. Por um lado, devido à utilização limitada de ferramentas, um protótipo pode ser produzido rapidamente, pois não é necessário tempo para conceber e produzir ferramentas, por exemplo. Daí a identificação de FA como prototipagem rápida. Contudo, a velocidade global de produção é inferior ao fabrico tradicional devido à construção por camadas que requer tempo [13]. O facto de apenas ser adicionado material onde este é necessário resulta numa diminuição de desperdício de material e do impacto ambiental a estes processos associados. Possibilitando a utilização de materiais reciclados [14].

Atualmente, o fabrico aditivo é mais adequado para uma produção rentável de produtos de baixo volume, mas de alto valor [15]. A tecnologia permite uma produção flexível e elevada personalização, uma vez que os ficheiros CAD podem ser alterados rapidamente [16].

2.1.1 Etapas fundamentais

A figura 2.1 ilustra o panorama geral de impressão em 3D. O fabrico de um componente através de tecnologias de FA consiste em 5 etapas fundamentais:

- 1 Recorrendo a um software de modelação 3D é obtido o protótipo virtual, o que permite refletir, com precisão, a aparência de um produto e os seus detalhes;

- 2 É gerado o modelo em malha de triângulos e exportado para um formato normalizado em ficheiro .STL;
- 3 Através de um *software slicer*, é realizada a preparação com recurso à divisão do produto em secções 2D, com espessuras na ordem das décimas de milímetro [3]. Desta etapa são obtidas as trajetórias de modo a controlar os movimentos/contornos a realizar.
- 4 Fabrico do modelo;
- 5 Após a obtenção do modelo físico, este é avaliado e realizada a fase de pós-processamento (acabamento e/ou remoção de material de suporte, por exemplo).

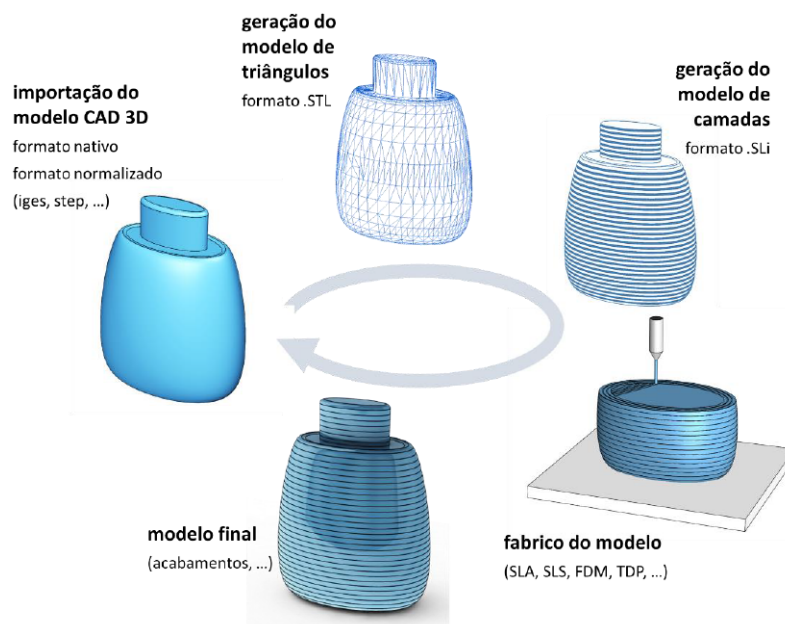


Figura 2.1: Ilustração das etapas de construção de um modelo por impressão 3D [3]

Cada tecnologia tem as suas vantagens e limitações, a escolha depende dos tipos de materiais a utilizar, desempenho e velocidade de processamento.

2.2 Processos de fabrico aditivo

Em janeiro de 2012, foi aprovada pela ASTM em parceria com a ISO uma listagem que distinguem os diferentes tipos de tecnologias de FA em 7 categorias, sendo estas: *Material Extrusion* (ME), *VAT Photopolymerisation* (VP), *Powder Bed Fusion* (PBF), *Material Jetting* (MJ), *Binder Jetting* (BJ), *Sheet Lamination* (SL) e *Directed Energy Deposition* (DED). A classificação apresentada neste estudo encontra-se mencionada na norma ISO/ASTM 52900:2015–Additive manufacturing: General principles and Terminology (<https://www.iso.org/standard/69669.html>) de 2015.

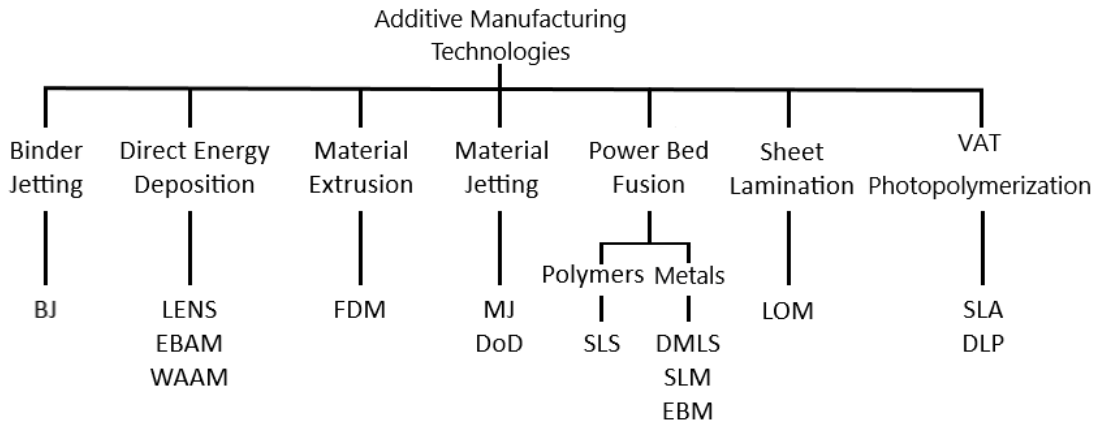


Figura 2.2: 7 categorias de tecnologias de fabrico aditivo de acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015 [4]

2.2.1 Binder Jetting (BJ)

Originalmente, a tecnologia BJ era denominada por *3D inkjet* (3DP) e desenvolvida na década de 90 pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [17]. Consiste na utilização de uma camada fina de pó depositada sobre a plataforma de construção e com o uso de cabeças de impressão, um líquido adesivo é pulverizado para a colagem das partículas do material. Este é um processo repetitivo até à obtenção do objeto na sua totalidade [17]; [5]; [3].

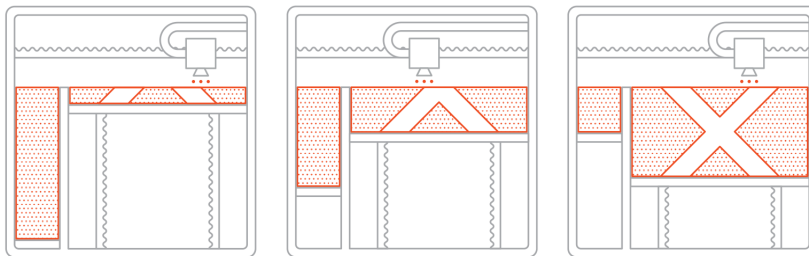


Figura 2.3: Esquematização ilustrativa do processo BJ [5]

Após a impressão, a peça encontra-se envolvida por pó não sintetizado e assim é mantida de modo a ganhar resistência estabelecendo a temperatura de forma gradual. O processo mais associado ao BJ é o 3DP capaz de obter peças autossuficientes (não existe necessidade de adição de material de suporte), sendo esta, uma característica de processos por deposição de camadas de pó.

O BJ veio-se mostrar vantajoso pelo baixo custo de produção, o volume de construção encontra-se entre os maiores comparativamente a todos os processos de impressão 3D [5], bem como a elevada velocidade de impressão. Contudo, os componentes obtidos por esta tecnologia são característicos de serem frágeis e de elevada porosidade. 3DP é capaz de produzir peças em cerâmica, metal, polímeros e ligas com efeito memória de forma [18].

2.2.2 Direct Energy Deposition (DED)

Deposição direta de energia consiste na fusão e deposição simultânea de material, normalmente metal, sob a forma de pó ou fio ao longo da construção do objeto. Esta tecnologia utiliza um concentrado feixe laser de alta potência para fundir o substrato a ser depositado e simultaneamente o substrato presente na plataforma de construção.

Contrariamente a tecnologias de impressão em cama de pó, o material é depositado como um cordão de soldadura [3]. As tecnologias *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Welding Arc Additive Manufacturing* (WAAM) e *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) são exemplos de DED. Embora possuam princípios e conceitos básicos idênticos, estas diferenciam-se relativamente à potência do laser, diâmetro do foco laser, tipo de laser utilizado, alimentação de material a ser depositado e esquema de controlo de movimentos [17].

Contudo, em componentes com geometria complexas é necessária a adição de material de suporte. Processos através de DED têm capacidade de produzir componentes de elevada qualidade com diferentes materiais e realizar reparações a um nível microscópico. Porém, a qualidade superficial e a velocidade exigem um equilíbrio de modo a evitar a necessidade de pós-processamento.

2.2.3 Material Extrusion (ME)

A extrusão de material consiste na passagem de um filamento contínuo de um termoplástico sólido através de uma cabeça extrusora pré-aquecida. De seguida, o material é depositado numa plataforma ao longo de uma trajetória pré-determinada, onde o filamento arrefece e solidifica para formar um objeto sólido [5]. Uma vez terminada a primeira camada, a extrusora e a plataforma são separadas num passo, e a segunda camada pode então ser depositada diretamente na peça de trabalho em crescimento [5].

FDM, ou *Fused Filament Fabrication* (FFF), é um processo de FA que pertence à família da extrusão de material. Esta é a tecnologia de impressão 3D mais comum e é frequente o processo de FA que as pessoas têm o primeiro contacto [5].

Uma desvantagem desta tecnologia é que o processo de obtenção de peças é moroso [13]. Todavia, cabeças extrusoras com múltiplos bicos podem ser facilmente integrados, o que possibilita a produção de um vasto leque de materiais e redução do tempo [18].



Figura 2.4: Ilustração das diferentes camadas em produto obtido por FDM [5]

O acabamento de produtos obtidos por ME é característico pela sobreposição de material o que resulta no chamado “efeito de escadas”, tal como representado na figura 2.4. O resultado deste efeito leva a que a resistência no eixo Z (eixo de orientação de impressão) seja menor que a resistência no plano XY [5].

Entre os vários materiais disponíveis, os mais recorrentes são *Poly lactide Acid* (PLA), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) que proporcionam o fabrico de peças funcionais com resistência mecânica. Com a evolução das impressoras 3D, o desenvolvimento de materiais termoplásticos foi também evolutivo. *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) e *Polyamide* (PA, conhecido como *Nylon*) tornaram, agora, possível a produção de componentes com capacidade de absorção de energia e com inúmeras aplicações.

2.2.4 Material Jetting (MJ)

Esta tecnologia recorre a cabeças de impressão para fazer a deposição de pequenas gotas de resina fotopolimérica que de seguida será solidificada com o auxílio de luz ultravioleta (UV). O processo MJ funciona como uma impressora de jato de tinta padrão, onde as camadas são construídas por deposição de material de forma rápida umas sobre as outras para criar um objeto sólido, assim como representado na Figura 2.5 [5];[3].

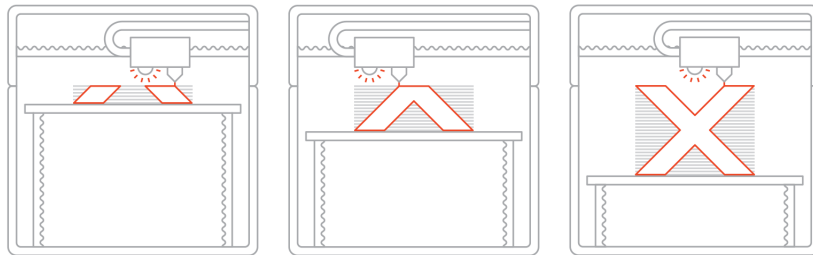


Figura 2.5: Esquemática ilustrativa do processo MJ [5]

A natureza de tecnologias MJ permite que diferentes materiais sejam impressos no mesmo objeto permitindo ajustar o componente tornando-o mais flexível ou mais rígido consoante a quantidade de material a ser depositado. Uma aplicação para esta técnica é, também, a impressão de estruturas de suporte a partir de um material diferente do modelo a ser produzido [5]. Por exemplo, a utilização de material solúvel facilita a remoção deste na fase de pós processamento, conseqüentemente, reduzindo o desperdício.

Uma variação do processo MJ utiliza cabeças de impressão *Drop-on-Demand* (DoD) para dispensar líquidos viscosos e criar peças semelhantes à cera. O DoD é utilizado para o fabrico de moldes e outras aplicações de moldagem [5].

O realçar desta tecnologia deve-se ao facto de poder fabricar vários objetos numa única linha sem afetar a velocidade de construção, sob a condição dos modelos estarem corretamente dispostos e o espaço dentro de cada linha seja otimizado. Assim, tecnologias MJ são capazes de produzir peças a um ritmo mais rápido do que outros tipos de impressoras 3D [17].

2.2.5 Powder Bed Fusion (PBF)

Consiste em uma tecnologia de fusão “em cama de pó” que utiliza uma fonte energia térmica, laser ou feixe de elétrons, para fundição seletiva de partículas dispostas em finas camadas, formando assim uma peça sólida (figura 2.6).

As principais técnicas que são utilizadas neste processo são *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Selective Laser Melting* (SLM), *Electron Beam Melting* (EBM) e *Selective Laser Sintering* (SLS).

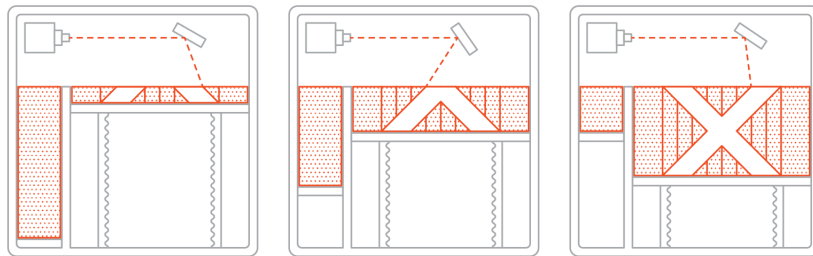


Figura 2.6: Esquemática ilustrativa do processo PBF [5]

Para o SLS, recorre a um laser para sintetizar seletivamente partículas de um pó. Este processo apenas utiliza polímeros termoplásticos como material para construir componentes camada por camada [5].

As tecnologias DMLS e SLM são dois processos semelhantes. Ambas utilizam metais em forma granular para obtenção de peças, todavia, estas diferenciam-se no método de fusão das partículas. SLM utiliza uma única temperatura de fusão, enquanto em DMLS o pó é composto por matérias com pontos de fusão variáveis, realizando a fusão a nível molecular.

O material não sintetizado, após o arrefecimento da peça, é removido e posteriormente reutilizado no sistema de entrega de pó. Este pó acaba por sofrer um processo de recolha, peneiração e junção a novo material, levando a um processo de reciclagem. Esta etapa final permite a esta tecnologia uma pequena pegada ecológica [5].

2.2.6 Sheet Lamination (SL)

Este conjunto de técnicas têm por base a agregação de sucessivas folhas de material, que são cortadas de forma a descreverem as sucessivas secções, de modo a dar vida a um objeto [18]. Atualmente descontinuada, esta tecnologia foi alvo de uma enorme divulgação por ser inovadora e alternativa, comparativamente a processos convencionais.

O processo de fabrico de objetos por laminados, designado por *Laminated Object Manufacturing* (LOM) requer a utilização de adesivo ou resina para garantir a união das folhas, em que cada folha representa uma camada transversal do objeto [3]. Devido ao princípio de construção variados processos foram desenvolvidos, onde as chapas poderiam ser cortadas e depois empilhadas ou empilhadas e depois cortadas, demonstrando a versatilidade desta tecnologia [18].

Contudo, o elaborado pós-processamento, o elevado risco de delaminação, consequência de fraca adesão das camadas e o baixo controlo dimensional resultou na procura por alternativas mais fiáveis.

Estudos ergonómicos, modelos de arquitetura e visualização topográfica são alguns exemplos de aplicações de produtos obtidos por esta técnica de FA.

2.2.7 VAT Photopolymerization (VP)

Este processo de FA consiste na solidificação um fotopolímero líquido (resina) curado seletivamente através de luz (figura 2.7) [3]. A fotopolimerização ocorre quando uma resina fotopolímero é exposta à luz de um comprimento de onda específico e sofre uma reacção química para se tornar sólida.

Os processos mais comuns de VP são *Stereolithography* (SLA) e *Digital Light Processing* (DLP). A diferença entre o SLA e o DLP é o tipo de luz que se utiliza para curar a resina.

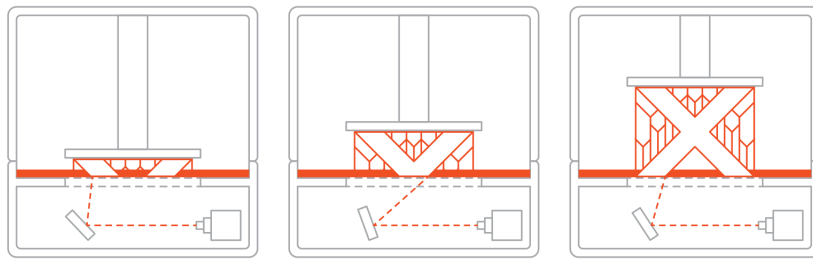


Figura 2.7: Esquemática ilustrativa do processo SLA [5]

Stereolithography: Esta tecnologia aditiva utiliza uma plataforma de construção submersa num tanque translúcido cheio de resina fotopolímero líquida. Uma vez submersa a plataforma de construção, um único ponto laser localizado no interior da máquina mapeia uma área transversal (camada) de um desenho através do fundo do tanque solidificando o material. As peças são tipicamente depois curadas pela luz UV para melhorar as suas propriedades mecânicas.

Direct light processing: Recorre a um projetor de luz digital que solidifica uma camada completa de uma só vez. Como o projetor é um ecrã digital, a imagem de cada camada é composta de pixels quadrados, resultando numa camada formada por paralelepípedos chamados *voxels* [5]. O DLP pode conseguir tempos de impressão mais rápidos em comparação com o SLA para algumas partes, uma vez que cada camada inteira é exposta de uma só vez, em vez de traçar a área da secção transversal com um laser.

2.3 Design para fabrico aditivo

O despontar do FA no setor industrial proporcionou uma liberdade sem precedentes a designers e engenheiros para a produção de peças/componentes [19]. Contudo, a falta de experiência e conhecimento sobre as capacidades, funcionalidades e limitações destas tecnologias resultam num impedimento do avanço tecnológico [20].

Então surgiu uma necessidade da criação de novas estratégias de desenho, metodologias e ferramentas de concepção [21] de modo a otimizar o potencial da liberdade geométrica do FA. Alfiaty ainda afirma que as fases de concepção e produção durante o processo de desenvolvimento do um novo produto são importantes pois qualquer decisão nesta fase poderá afetar diretamente o custo e a qualidade do produto final [22].

De modo a responder as estas limitações foi criado o termo *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), em português Design para Fabrico Aditivo (DpFA). DpFA tem como principais objetivos fornecer ferramentas técnicas e diretrizes concretas para adaptar o desenho a um certo conjunto de restrições a jusante; medir e compreender o impacto do processo de concepção na produção de modo a melhorar a qualidade do produto e a sua evolução; e explorar a relação entre design e fabrico e o impacto em designers ou desenhista [22]; [12].

2.3.1 Design generativo

Num mundo em constante mudança, onde a tecnologia está em constante evolução, existe sempre margem para ideias inovadoras.

O design generativo é um processo que permite a exploração do design através da definição de parâmetros predefinidos. O desempenho, requisitos espaciais, tipo de material a utilizar bem como o método de FA são alguns exemplos. Um sistema de desenvolvimento generativo é capaz de produzir uma única ou várias soluções otimizadas para um determinado objeto a ser projetado [23].

O levantamento de constrangimentos geométricos, atenuados pelos métodos de FA, e a utilização de ferramentas/software de design generativo estimulam o (re)desenho de produtos com geometrias complexas possibilitando a obtenção de objetos otimizados a nível estrutural tornando-os mais leves e uma diminuição do desperdício de material. Uma vantagem desta abordagem, para além de tornar visíveis as variações do design, é que é flexível, permitindo alterar a programação em qualquer altura, facilitando o desenvolvimento e permitindo avaliar rapidamente diferentes conceitos ou variações para uma solução de desenho [24].

2.3.2 Otimização topológica (OT)

Otimização Topológica (OT) é um método numérico aplicado na fase conceptual do desenvolvimento de componentes com recurso a softwares CAD [23]; [25].

Este método é inserido na fase de concepção conceptual com o intuito de gerar conceitos de componentes [26]. Dessa forma, resulta um melhor desempenho estrutural, através da identificação da distribuição ótima de material de acordo com condições fronteira, cargas e restrições definidas pelo designer/engenheiro consoante o propósito do produto a ser desenvolvido. Contudo, a OT não só otimiza as formas de contorno, como também altera a topologia interna [10].

O resultado são objetos com geometrias complexas, formas orgânicas e com redução de material sendo depositado apenas o necessário de modo a satisfazer os requisitos de funcionalidade, como evidenciado na figura 2.8.



Figura 2.8: Exemplo de componente obtido por Otimização Topológica (<https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/02/3d-printed-mechanics/>)

2.3.3 Estruturas *lattice* (EL)

Estruturas *Lattice* são um tipo de materiais celulares geradas pela repetição de uma célula unitária ou conjunto de células seguindo um padrão espacial definido [6]. Estas são características pela capacidade de aumentar as propriedades mecânicas dos objetos onde são incorporadas e reduzir peso satisfazendo o desejo de colocar material apenas onde este é necessário [27]. As principais vantagens da EL incluem altos rácios de resistência ao peso, boa absorção de energia e boas características de isolamento térmico e acústico. [26].

Com o avanço de softwares de modelação, é possível que num futuro muito próximo estas estruturas venham a desenvolver um papel importante no mundo da indústria e fabrico.

As EL podem ser divididas em duas categorias, estruturas estocásticas/aleatórias e periódicas. As estruturas estocásticas são caracterizadas por padrões aleatórios e não apresentam uma célula unitária. Também definidas como espumas. Ao contrário, as estruturas periódicas têm como característica a repetição de uma célula unitária [6].

Estas estruturas podem ser definidas por dois tipos. O primeiro é definido pela periodicidade em apenas duas dimensões, designadas de materiais celulares prismáticos. O segundo tipo apresenta periodicidade tridimensional, designados de materiais celulares periódicos. A figura 2.9 ilustra os diferentes tipos de estruturas indicados.

As estruturas celulares *lattice* apresentam inúmeras vantagens, nomeadamente:

Personalização: A natureza aditiva permite a construção de peças com componentes sem precedentes geométricos, assim como um vasto leque de materiais que a produção aditiva disponibiliza. As estruturas *lattice* podem ter diferentes propriedades nos diferentes eixos X, Y, Z das células, consoante os requerimentos do componente onde serão inseridas [19].

Flexibilidade: A impressão 3D permite a integração de EL em, praticamente, qualquer modelo CAD. Elimina também, o dilema que muitos engenheiros experienciam quando necessitam de considerar a funcionalidade e a versatilidade. Todavia, este processo aditivo ainda tem algumas limitações para aquisição de estruturas, tais como, o diâmetro mínimo (0.15mm) ou a distância entre elementos ser inferior a 1mm para não recorrer à utilização de material de suporte.

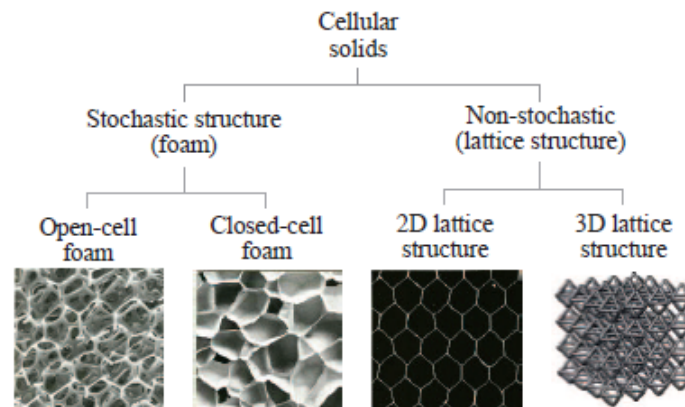


Figura 2.9: Categorias de materiais celulares [6]

Custo de produção: As EL são obtidas por processos de fabricação aditiva, a necessidade de ferramentas dispendiosas para fabricar as peças é eliminada. Reduzindo assim, o custo de produção quando comparados com processos de obtenção das estruturas por processos subtrativos.

Nesta dissertação, foram consideradas as estruturas celulares periódicas como as mais apropriadas.

Capítulo 3

Estudo de objeto de atuação

A utilização de meios de transporte como ciclomotores, motociclos e velocípedes, expõe o condutor a fatores de risco muito superior comparativamente a utilizadores de veículos de 4 rodas. Por sua vez, deveriam ser redobrados os cuidados a ter na sua utilização. Contudo, a importância do uso de capacete é muitas vezes posta em causa e é necessário refletir o seu impacto na segurança rodoviária.

Segundo o Código da Estrada nacional, a sua utilização é de carácter obrigatório para ciclomotores e motociclos, mas de carácter facultativo para utilizadores de velocípedes. Apesar de várias campanhas de sensibilização, ainda existe um longo caminho para sensibilizar e educar as pessoas.

Com o surgimento de trotinetes e bicicletas elétricas e com a criação de redes de aluguer temporário, são cada vez mais os utilizadores deste meio de transporte individual. Contudo, com o facto de não existir obrigatoriedade na utilização de capacetes, foi registado um aumento de acidentes. No ano de 2019, com o apoio da Polícia de Segurança Pública (PSP), o Automóvel Clube de Portugal (ACP) lançou uma campanha de sensibilização com o tema **“Não sejas Alberto, pensa pela tua cabeça – Usa capacete!”** direcionado para condutores de trotinetes e bicicletas elétricas, com o intuito de demonstrar a falta e a necessidade do uso de capacete.



Figura 3.1: Campanha sensibilização promovida pelo ACP

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), o uso de capacete diminui em 42% o risco de lesões fatais e diminui em cerca de 69% a hipótese de ferimentos na cabeça em caso de acidente. Ainda indicam que a maioria das fatalidades que ocorrem em acidentes que envolvem motociclos e velocípedes devem-se a ferimentos na zona da cabeça e pescoço.

3.1 Tipologia de capacetes de ciclismo

Foi constituída uma análise de mercado com o objetivo de identificar diversas tipologias de capacetes do que resultou 4 principais tipologias, são então:

Estrada. São concebidos para serem tão leves e aerodinâmicos quanto possível para uma condução suave sem comprometer a segurança. Característicos por terem aberturas de ventilação maiores o que aumenta o arrefecimento da cabeça para longas distâncias. Uma conceção aerodinâmica e um baixo volume reduzem a resistência do ar para aumento da *performance* e velocidade.



Figura 3.2: Exemplo capacete estrada da marca *Rudy*
(<https://www.rudyproject.com/pt/pt-pt/products/helmets/venger>)

Montanha. Capacete característico de possuir uma viseira na secção frontal. Esta, permite uma melhor proteção solar e de sujidade proveniente do tipo de terreno (trilhos, terra, etc.). Os acidentes em terrenos agrestes, o risco de embater com a parte de trás da cabeça é superior. De modo a aumentar a proteção dos ciclistas, estes capacetes são constituídos por uma secção traseira alongada.



Figura 3.3: Exemplo capacete montanha da marca *Scott*
(<https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-stego-plus-ce-helmet>)

Citadinos. Capacetes mais simples, visto que a velocidade, a aerodinâmica e a dissipação de calor não são os fatores mais importantes já que o esforço não é tão elevado. Muitos destes capacetes vêm com tiras refletoras e luzes traseiras para uma visibilidade extra, tornando-os perfeitos para quem se desloca em cidades.



Figura 3.4: Exemplo capacete citadino da marca *Scott*
(<https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-jibe-ce-helmet>)

Criança. Capacetes são dimensões menores, mas com grande proteção pois as crianças são particularmente propensas a cair. Naturalmente, muito coloridos o que incentiva o seu uso.



Figura 3.5: Exemplo capacete de criança da marca *Scott*
(<https://www.scott-sports.com/pt/pt/product/scott-spunto-kid-ce-helmet>)

3.2 Estrutura e elementos constituintes

Camada exterior. Trata-se de uma estrutura rígida que protege a abrasão, a penetração de objetos externos e distribui as forças de impacto por uma maior área. Com uma espessura média de 2mm e obtida em material polimérico como por exemplo ABS, esta camada é responsável por fornecer uma melhor aerodinâmica e aparência.

Camada intermédia. Produzida em EPS. A utilização deste material é o mais recorrente pois permite a utilização de processos de injeção em moldes, diminuindo os custos de produção. Sendo esta camada, a principal responsável pela absorção de energia resultante de impacto e assim protegendo o máximo possível a cabeça.

Camada interior. Secção em contacto com a cabeça do utilizador, recorre a uma combinação de módulos de espumas de memória para oferecer um melhor conforto ao utilizador. Geralmente removíveis para melhor higiene.

Sistema de estabilização. Localizado na parte traseira da cabeça, este permite ajustar o capacete à cabeça. Este veio se demonstrar uma mais-valia para os fabricantes permitindo reduzir o número de tamanhos de capacete necessários produzir para diferentes tamanhos de cabeça. *Boa Technology Inc.* é a empresa responsável por patentear um sistema com o objetivo de otimizar o ajuste e fornecer precisão e adaptabilidade [28]. Este foi inicialmente desenvolvido como sistema de fixação de calçado e agora aplicado em capacetes como demonstrado na seguinte figura 3.6:



Figura 3.6: Ilustração do sistema de estabilização desenvolvido pela empresa *Boa Technology Inc* (<https://themtblab.com/2018/07/boa-technology-and-mips-partner-for-improved-helmet-fit-and-protection.html>)

Algumas tecnologias inovadoras têm surgido de modo a elevar a proteção fornecida pelos capacetes de ciclismo. De seguida, são apresentados 2 exemplos, sendo estes:

- MIPS

A tecnologia *Multi-directional Impact Protection System* (MIPS), tal como indicado pela sigla, trata-se de uma tecnologia que tem a capacidade de absorver impactos em diversos ângulos [29]. Esta consiste numa “camada de baixa fricção” que permite o movimento de rotação do capacete sobre a cabeça do utilizador.

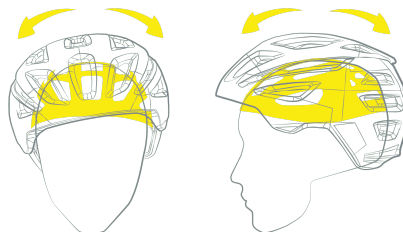


Figura 3.7: Ilustração do funcionamento da tecnologia MIPS (<https://bttlobo.com/o-teu-cerebro-esta-mesmo-prottegido-com-o-teu-capacete-a-mips-explica/>)

Quando a cabeça é sujeita a um impacto, o cérebro desliza ao longo de uma membrana na superfície interna do crânio, o que reduz as forças transmitidas ao cérebro. Este sistema foi desenvolvido para imitar o próprio sistema de proteção do cérebro. Diversas marcas incluíram esta tecnologia nos seus produtos, sendo a marca *Scott*, um desses exemplos.

- *WaveCel*

A tecnologia *WaveCel* apresenta uma camada intermedia em forma de favo de mel. Concebida para ser mais eficaz do que os capacetes tradicionais em EPS, foi desenvolvida uma zona de deformação que absorve tanto as forças de impacto primário como a energia rotacional resultante de determinados acidentes de ciclismo [30].

Esta tecnologia apenas é encontrada em alguns capacetes da marca *Bontrager*.



Figura 3.8: Ilustração da tecnologia *WaveCel* (<https://road.cc/content/review/265229-bontrager-xxx-wavecel-helmet>)

3.3 Aplicação de fabrico aditivo em capacetes

Como referência para a realização desta dissertação foi escolhido o capacete da marca *Hexr*, figura 3.9, dando assim origem ao caso de estudo a apresentar.

Este, é descrito como o primeiro capacete personalizado a ser comercializado, com o intuito de evitar a utilização de espumas EPS. Como substituição, a empresa desenvolveu um capacete modelar com a integração de estruturas celulares prismáticas, estruturas alveolares hexagonais, comumente conhecidas por estruturas “favo de mel”.

A *Hexr* produz o seu capacete utilizando Poliamida 11 (PA11), com recurso ao processo de manufatura aditiva - SLS. PA11, um material recorrente na indústria aeroespacial, trata-se de uma matéria-prima 100% renovável [31]. Ao contrário, a espuma EPS é obtida utilizando petróleo bruto (crude), por conseguinte não é biodegradável.

Proteção: De acordo com o descrito no site da marca, ao efetuar todos os testes exigidos pela norma reguladora EN 1078, indicados no Cap.3.4, o capacete *HEXR* demonstrou uma eficácia de 26%, pelo que apresenta os melhores resultados disponíveis no mercado. Para o teste de impacto, este modelo obteve um excelente desempenho com uma aceleração linear média de 144G, onde o limite máximo para aprovação é de 250G. A empresa afirma que o controlo do impacto da estrutura alveolar hexagonal é 68% mais eficaz quando comparado com capacete em EPS [31].



Figura 3.9: Capacete desenvolvido pela *HEXR* com uma estrutura alveolar hexagonal (<https://hexr.com/blogs/all/how-a-hexr-is-made-1>)

Customização: Este é um ponto onde a impressão 3D se destaca no mercado de proteção rodoviária passiva. Ao ser produzido por fabrico aditivo, o processo de design do capacete inclui um *scan* 3D à cabeça do cliente e permite a recolha de dados e criação de curvas transversais. Satisfazendo, plenamente, as necessidades individuais do capacete e melhorando o conforto do utente. Um fator importante que permite compensar o peso de 344g [31].

3.4 Norma de regulamentação capacetes, EN1078

Foram estabelecidas normas em capacetes com o intuito de avaliar o desempenho de proteção da cabeça contra impactos. Estas normas prescrevem uma série de testes para assegurar um nível mínimo de desempenho do capacete em relação a uma série de critérios que afetam a segurança dos utilizadores. Estes critérios incluem:

- **Materiais:** assegura que os materiais utilizados para a produção de capacetes não afetam a pele do utilizador e que o suor e produtos de cabelo não interferem na função do capacete;
- **Requisitos de construção:** certifica durabilidade e facilidade de manuseamento. É característico este ser leve, ventilado e permitir a utilização com óculos;
- **Requisitos do sistema de retenção:** resistência das fivelas e estabilidade do capacete em utilização;
- **Cobertura:** garante que uma percentagem da cabeça é protegida pelo capacete;
- **Visão:** controlo do design de modo a não interferir com o campo de visão.

A normas EN 1078:2012+A1:2012 são direcionadas para capacetes de bicicleta produzidas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), e aplicadas no ano de 1997 em todos os países membros [1].

Todos os capacetes são concebidos e testados de modo a satisfazer os requisitos presentes na norma. De uma forma geral, as normas de capacetes direcionadas para atividades não motorizadas utilizam impactos de baixa velocidade para a realização dos testes que asseguram um nível mínimo de desempenho, no entanto, estes testes não recriam necessariamente cenários de acidentes específicos. Visto que, a proteção dada pelos capacetes depende das circunstâncias do acidente e que nem sempre pode evitar danos maiores [1].

Apesar de ser muitas vezes ignorado, os capacetes são concebidos para proteger o seu utilizador de um único impacto, qualquer queda ou colisão adicional, a proteção poderá estar comprometida e não proteger com a devida eficácia. Isto deve-se ao facto da estrutura constituinte do capacete poder ser danificada ao absorver a energia resultante de um impacto, mesmo que os danos não sejam aparentes.

É possível afirmar que os testes de desempenho exigidos pela norma influenciam o design do capacete. Com o avanço das tecnologias de proteção, os capacetes reduzem substancialmente os ferimentos na cabeça, contudo estes são concebidos principalmente para reduzir a desaceleração linear em cabeças-manequim, em vez de serem otimizados para evitar lesões na cabeça humana.

A norma indica vários testes a serem realizados, contudo para validação de conceito apenas será utilizado e testado para ensaios de impacto. De acordo com a norma, os requisitos dos ensaios de impacto implicam que o capacete forneça proteção à testa, parte traseira, laterais, têmporas e coroa da cabeça. Para certificação, o teste de impacto consiste no impacto em 2 bigornas distintas: plana e lancil.

Na figura 3.10 é possível visualizar o mecanismo de teste e as respetivas bigornas, lancil e plana. Estes ensaios não deverão ultrapassar $250G$ de pico de aceleração quando realizados a velocidades de $5.42m/s$ e $4.57m/s$, respetivamente.



Figura 3.10: Mecanismo de ensaios de impacto

Teste de resistência do sistema de retenção: a norma impõe um teste com recurso a um martelo de inércia, com $(4 \pm 0.2)kg$ de massa, suspenso pelas fivelas e a queda do peso ao longo $(600 \pm 5)mm$ [1].

Teste de estabilidade do sistema de retenção: com o intuito de testar a estabilidade do capacete e do sistema de retenção através da afixação de um martelo de inércia de $10kg$ de massa e uma altura de queda de $(175 \pm 5)mm$. Para cumprimento da norma, é permitido a movimentação do capacete na cabeça-manequim, contudo não pode ser removido.

De salientar que, este estudo não pretende aprofundar o estudo do sistema de retenção que neste caso seriam o sistema de fivelas e o mecanismo de ligação. O estudo foca-se no desenvolvimento de estruturas para otimização da absorção de energia, com o contributo que o fabrico aditivo poderá trazer tendo em conta as suas potencialidades e particularidades.

É relevante referir que a norma não contém requisitos de conformidade de produção.

3.4.1 Cabeça-manequim

As cabeças-manequim a utilizar devem estar em conformidade com a norma EN 960:2006. A tabela 3.1 apresenta as dimensões normalizadas e a massa dos modelos a utilizar.

Tabela 3.1: Características das formas de cabeça utilizadas em ensaios de impacto, de acordo com a norma [1]

Etiqueta da forma de cabeça	Designação do tamanho da forma da cabeça (circunferência mm)	Circunferência interna do capacete (mm)	Massa (kg)
A	495	500	3.10 ± 0.10
B	505	510	-
C	515	520	3.60 ± 0.10
D	525	530	-
E	535	540	4.10 ± 0.12
F	545	550	-
G	555	560	-
J	575	570	4.70 ± 0.14
K	585	580	-
L	595	590	-
M	605	600	5.60 ± 0.16
N	615	610	-
O	625	620	6.10 ± 0.18
P	635	630	-
Q	645	640	-

Contudo, a norma EN 1078:2012+A1:2012 indica que apenas as circunferências 495, 535, 575, 605 e 625 mm podem ser utilizadas para determinar a capacidade de absorção de energia [1].

Assim, o modelo da cabeça a ser utilizado, para este caso em concreto, tem $605mm$ de circunferência e uma massa de $5.60 \pm 0.16kg$.

Capítulo 4

Estudo estruturas a integrar o capacete

4.1 Espumas

Atualmente, o material mais comum na produção de capacetes é uma espuma de polistireno expandido (EPS), espuma essa obtida por injeção com baixa densidade e excelentes propriedades de absorção de energia.

Os objetos obtidos por injeção de espumas de polistireno expandido dependem de 2 conjuntos de propriedades: a geometria – o que inclui o tamanho das células, a forma, a densidade e a distribuição do material num volume; e as propriedades do material.

O gráfico 4.1 apresenta uma curva tensão-deformação obtida por ensaio experimental à compressão:

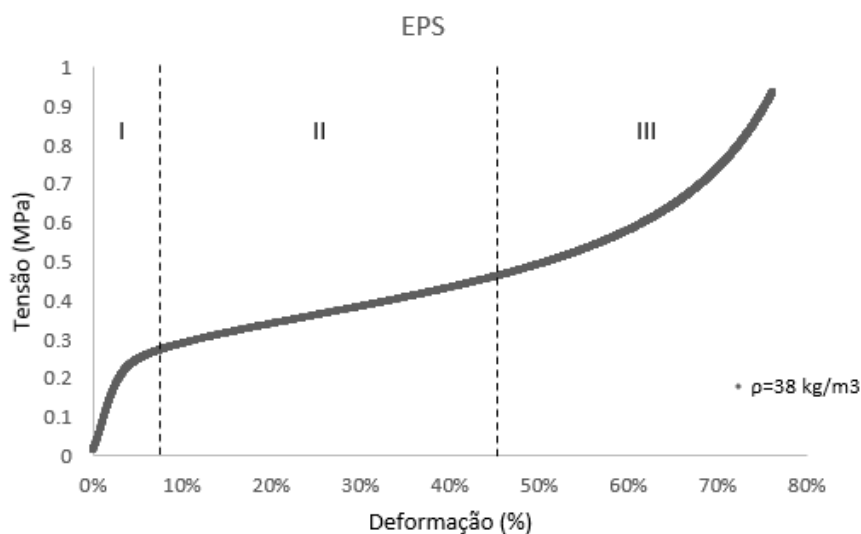


Figura 4.1: Curva de tensão-deformação de teste à compressão de uma espuma EPS

A curva, de acordo com [32], pode ser dividida em 3 regiões:

- I – Demonstra uma elasticidade linear a baixas tensões. As tensões na estrutura devem exceder a resistência de cedência do material com o intuito de converter a entrada de energia cinética em energia inelástica e otimizar a absorção de energia.
- II – Zona de deformação longa. A este nível de deformação, a tensão de cedência é atingida e a deformação é irrecuperável [33].

O trabalho realizado por uma força é igual à sua magnitude multiplicada pelo deslocamento, ou seja, como o objetivo é diminuir a força, é necessário verificar um aumento do deslocamento, representado na equação 4.1:

$$W = F * d \quad (4.1)$$

onde W corresponde ao trabalho, F à força e d à deformação.

Para ocorrer uma diminuição uniforme da velocidade v , para $0m/s$ requer uma distância d , equação 4.2:

$$d = \frac{v * t}{2} \quad (4.2)$$

onde t corresponde ao tempo.

A distância representada é sobre a qual a força atua para dissipar energia cinética. Tendo em conta a equação acima descrita, é possível entender que quanto maior a duração da aplicação da força (t), mais suave será a dissipação de energia.

- III – A última região ilustra a densificação da estrutura. Quando todos os elementos constituintes comprimem completamente sob grandes tensões compressivas, provocam uma subida abrupta da curva tensão-deformação. Assim, a capacidade de absorver energia é significativamente reduzida [33].

4.2 Metodologia de Testes Experimentais

Para melhor compreensão do funcionamento das estruturas *lattice*, quando submetidas a forças de impacto, diversas amostras de diferentes malhas serão submetidas a testes de compressão. Os testes de compressão, aplicáveis a este estudo, podem ser realizados em dois métodos distintos: testes quasi-estáticos e em condições de impacto.

Em testes quasi-estáticos, as amostras com as diferentes estruturas são comprimidas a uma velocidade constante. Contudo, estes testes não são uma simulação real de condições de colisão, pois sob condições ideais, a velocidade de compressão diminui desde a velocidade de impacto inicial até ao repouso, à medida que a amostra absorve energia.

Permitindo estudar os materiais e a geometria das estruturas, os testes quasi-estáticos não garantem um desempenho satisfatório quando sujeitos a condições reais de uma colisão.

Por outro lado, os testes de impacto exigem equipamento específico para acompanhar o processo de compressão visto que este ocorre numa fração de segundo.

Assim, os testes quasi-estáticos serão os utilizados para estudar os mecanismos de falha nos materiais, através da seleção de velocidades de compressão adequadas.

4.3 Estudo geométrico

Com o intuito de explorar o comportamento das espumas quando submetidos sob forças compressivas, foram realizados testes de compressão em amostras com dimensões $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$.

Os teste foram realizados com o auxílio de uma máquina de ensaios universal de modelo *Shimadzu AGS-X* com uma célula de carga calibrada de 10 kN , à temperatura ambiente e uma velocidade de deslocamento de 15 mm/min .

O gráfico seguinte ilustra os resultados obtidos dos testes realizados:

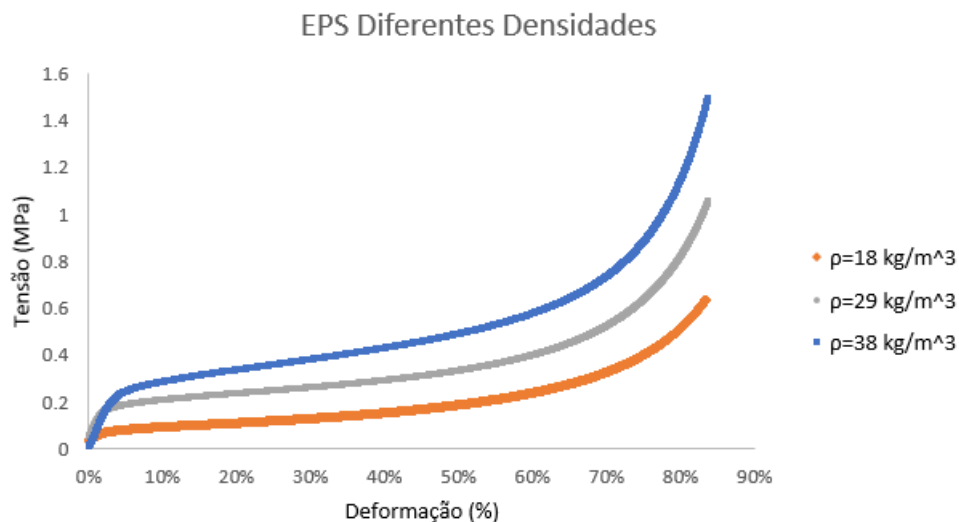


Figura 4.2: Comportamento compressivo das amostras de EPS com diferentes densidades

A energia absorvida por unidade de volume, $W_v \text{ (Jm}^{-3}\text{)}$ é definida pela área sob a curva tensão-deformação nominal como indicado na seguinte equação:

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.3)$$

Onde $\sigma(\varepsilon)$ é a tensão de fluxo da estrutura e ε_D é a tensão de densificação.

A absorção de energia específica por unidade de massa, $W_m \text{ (Jkg}^{-1}\text{)}$, é crucial para a conceção de peças que requerem redução de massa, esta é calculada dividindo a equação 4.4 pela densidade da amostra, representada pelo produto da densidade relativa ρ' pela densidade do material utilizado ρ_S :

$$W_m = \frac{W_v}{\rho' \rho_S} \quad (4.4)$$

Na Tabela 4.1 são apresentados dados experimentais sobre a absorção de energia específica para o poliestireno expandido. Os resultados obtidos são provenientes de vários ensaios de compressão estática em EPS de diferentes densidades.

O método utilizado consiste na compressão por dois cilindros de aço, tratando-se de um método livre o que permite expansão axial.

Tabela 4.1: Resultados de testes de compressão em EPS até densificação

EPS	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida por volume [kJ/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
Baixa Densidade	18	82.53	4.59
Média Densidade	27	160.33	5.94
Alta Densidade	38	272.63	7.17

4.3.1 Materiais

A seleção de materiais está restringida a polímeros desenvolvidos especialmente para impressão 3D. Para este caso de estudo, foram selecionados dois polímeros distintos desenvolvidos pela marca *Ultimaker*: *Tough PLA* e *Nylon*.

Com o objetivo de otimizar a absorção de energia, o material a utilizar terá de ser capaz de resistir a tensões e deformações elevadas de modo a majorar a área sob a curva.

O polímero PLA é característico por ser um material frágil e, à primeira vista, não será a melhor opção para obter uma desaceleração suave, no entanto a versão *tough PLA* é indicada pela marca como um filamento menos quebradiço que o PLA convencional e poderá ser uma solução para esta dissertação.

O *nylon* tem um comportamento semelhante a um material elástico perfeitamente plástico característico pela deformação, após a cedência do material, ocorrer sem variar a tensão (elástico perfeitamente plástico). Esta opção poderá ser a alternativa mais indicada para obtenção de energia absorvida.

A tabela 4.2 apresenta algumas propriedades dos filamentos escolhidos.

Tabela 4.2: Propriedades dos filamentos utilizados neste caso de estudo

Material	<i>Tough PLA</i>	<i>Nylon</i>
Densidade [kg/m^3]	1240	1140
Módulo de Young [MPa]	1820	579
Tensão de Corte [MPa]	2400	318.9
Tensão de Cedência [MPa]	49.5	27.8

4.4 Estruturas desenvolvidas

Com o objetivo de aumentar a absorção de energia para amortecer as cargas transmitidas em impactos foram desenvolvidas as primeiras estruturas.

As características de deformação das estruturas dependem tanto da sua geometria como do material em que são obtidas. Foi dada uma especial atenção aos ângulos utilizados nos elementos constituintes das estruturas de modo que estas sejam auto-suportadas, isto é, não requerem a necessidade de suporte. Este fator é de elevada importância, em termos de design, de modo a evitar a impressão de material de suporte, visto que o capacete será impresso na sua totalidade e posteriormente seria inexequível a remoção do mesmo.

Assim, para que as estruturas sejam otimizadas, certos parâmetros devem ser modificados e analisados a fim de entender como as estruturas se comportam quando estão sujeitas a forças de compressão e a influência destas sendo impressas em 3D.

Este último parâmetro é muito importante devido à ligação entre camadas bem como se a impressão foi realizada em condições ótimas para obter os melhores resultados atingidos, daí terem sido explorados os melhores parâmetros para a impressora utilizada.

A seguinte secção apresenta em maior detalhe as estruturas estudadas bem como as evoluções que estas sofreram. Apresenta também algumas etapas de eliminação até ser obtida a estrutura final e a promissora de melhores resultados quando aplicada no caso de estudo, o capacete de ciclismo.

De notar que, ao longo deste documento, a direção Z refere-se à direção em que os espécimes foram impressos. As estruturas abaixo apresentadas, consistem em elementos individuais com as dimensões de $15 \times 15 \times 15 \text{mm}^3$.

4.4.1 Estrutura 1: Círculos

A primeira estrutura a ser desenvolvida consiste em uma estrutura completamente fechada. Esta ideia foi desenvolvida de modo a armazenar ar dentro da estrutura e quando sujeita a forças de compressão, o ar funcionar como uma almofada de ar.

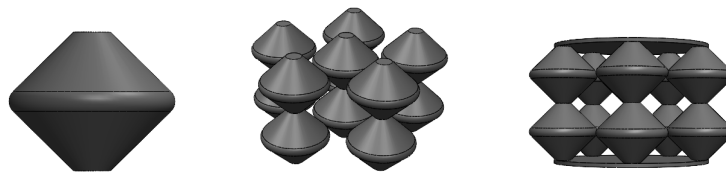


Figura 4.3: Representação CAD da estrutura "Círculos"

As estruturas "Círculos" foram concebidas com 6 elementos base, um elemento central e 5 concêntricos a um raio de 20mm . As células individuais têm como dimensões $15 \times 15 \times 15 \text{mm}^3$, o que corresponde a um arranjo $2 \times 2 \times 2$ de células e 1mm de espessura de parede.

As variáveis geométricas a serem aplicadas são: o ângulo de inclinação das paredes, a espessura e a área de contacto entre os elementos.

Foram adicionados uma base e um topo às estruturas com $1mm$ de espessura de modo a unir as células e representar a camada interior e exterior do capacete.

Para esta estrutura foram obtidas densidades muito superiores aos exemplares em EPS, contudo foram consideradas com o intuito de a energia absorvida compensar o aumento da massa substancial.

Os espécimes obtidos em *tough* PLA revelaram uma densidade relativa de 135 kg/m^3 e 124 kg/m^3 para os modelos em *nylon*.

4.4.2 Estrutura 2: Diamante Hexagonal

Uma estrutura simples com apenas 3 braços que requer menos massa poderá ser solução para uma boa capacidade de absorção de energia. É o que se pretende obter com o desenvolvimento da segunda estrutura – Diamante Hexagonal.

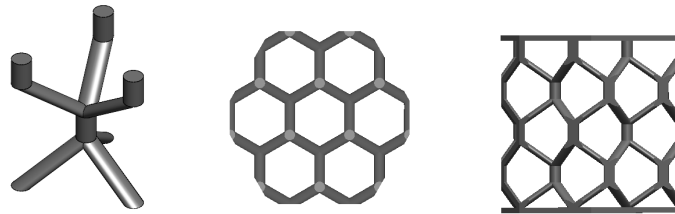


Figura 4.4: Representação CAD da estrutura "Diamante Hexagonal"

Esta estrutura não tem simetria nos eixos X e Y, o que revelou uma maior dificuldade na obtenção de uma configuração estável de modo a proceder aos testes de ensaio com volumes possíveis de comparar com as outras estruturas.

Uma vez que esta não pode ser ordenada linearmente, recorreu-se a um corte em forma de hexágono que permitiu não só dispor a estrutura nos eixos das abcissas e das ordenadas como também dar seguimento no eixo das cotas. A solução está apresentada na figura 4.4.

Nesta estrutura foi estudado o resultado da variação de diâmetro dos elementos, assim como, a influência da variação de tamanho das células unitárias. De seguida foram adicionados o topo e a base com $1mm$ de espessura, ilustrado abaixo.

Para esta estrutura, em *tough* PLA foi obtida uma densidade relativa de 81 kg/m^3 e 74 kg/m^3 para os modelos em *nylon*.

4.4.3 Estrutura 3: Mola

Tal como o nome indica, esta estrutura foi desenvolvida baseada no movimento de uma mola e na capacidade de esta absorver energia através da sua deformação. Na figura 4.5, é facilmente notório o aumento de espessura nos nós de mudança de direção, visto que seria uma zona de maior acumulação de tensões foi, assim, definida a modelação 3D.

Em termos de disposição, as células unitárias, assim como na estrutura "Círculos", foram dispostas ao longo de 2 círculos concêntricos com diâmetros de 12 e $24mm$.

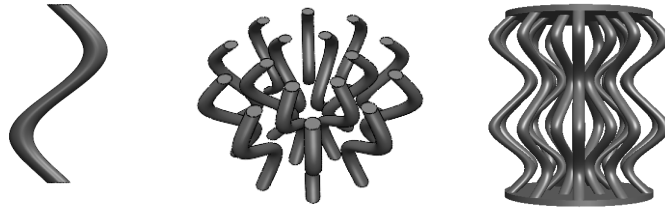


Figura 4.5: Representação CAD da estrutura "Mola"

Como variáveis geométricas, o foco principal foi a variação do diâmetro e o número de elementos presentes na disposição circular. Mais uma vez, de modo a unir e consolidar a estrutura foram adicionados uma base e um topo com $1mm$ de espessura e igualar as restantes estruturas.

Para elementos com $1mm$ de espessura nas extremidades, os espécimes obtidos em *tough* PLA foi obtida uma densidade relativa de 76 kg/m^3 e para os modelos em *nylon* uma densidade relativa de 70 kg/m^3 .

4.4.4 Estrutura 4: *Body Centered Cubic* (BCC)

Esta configuração trata-se de uma estrutura piramidal com quatro pernas que suportam a estrutura. Um ponto intermédio resulta da união das quatro pernas superiores e inferiores, tornando-se um ponto crítico quando sujeito a forças de compressão.

As variáveis geométricas a serem aplicadas são o diâmetro e o ângulo de inclinação das barras. As estruturas "BCC" foram concebidas com as dimensões $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$. As células individuais têm como dimensões $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$, o que corresponde a um arranjo $2 \times 2 \times 2$ de células e inicialmente desenvolvidas com $1mm$ de diâmetro das barras.

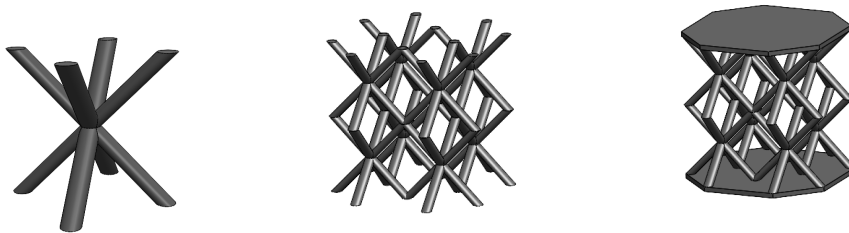


Figura 4.6: Representação CAD da estrutura "BCC"

Para esta estrutura, os espécimes obtidos em *tough* PLA foi obtida uma densidade relativa de 65 kg/m^3 e 60 kg/m^3 para os modelos em *nylon*.

Em suma, na tabela 4.3 estão apresentadas as densidades relativas das diferentes estruturas. Estes dados foram obtidos através do software *Solidworks* com os valores de densidade de 1240 kg/m^3 para o *tough* PLA e 1140 kg/m^3 para o *nylon*.

Tabela 4.3: Resumo da densidade das diferentes estruturas apresentadas

Estrutura	Material	Densidade [kg/m^3]
Círculos	<i>Tough PLA</i>	134.66
	<i>Nylon</i>	123.83
Diamante Hexagonal	<i>Tough PLA</i>	80.51
	<i>Nylon</i>	74.23
Mola	<i>Tough PLA</i>	76.36
	<i>Nylon</i>	70.23
BCC	<i>Tough PLA</i>	64.93
	<i>Nylon</i>	59.71

4.5 Resultados experimentais das estruturas

Serão apresentados os valores de energia absorvida e gráficos resultantes dos testes de compressão nos mesmos termos dos ensaios realizados para as amostras em EPS. Para todos os testes realizados, foi aplicado um controlo de deslocamento de $15mm/min$.

4.5.1 Estrutura 1: Círculos

A figura 4.7 apresenta as curvas tensão-deformação resultantes dos testes à compressão desenvolvidos. Para o material *tough PLA*, é visível no início do gráfico um pico que indica elevadas tensões para quebrar o equilíbrio da estrutura até ao colapso dos primeiros elementos. Com o aumento da deformação as camadas vão colapsando e acumulando material na base da estrutura. A cerca de 50% de deformação é notória a quebra da segunda camada de elementos e posterior densificação.

Esta última fase é característica pela quebra de todas as camadas, o que requer um aumento da carga e conseqüentemente um aumento da tensão. Os valores obtidos da energia absorvida são recolhidos até ao início desta fase.

No geral, a estrutura "Círculos" apresenta uma zona de deformação longa e com valores a rondar $1.5MPa$, valores estes bastantes satisfatórios.

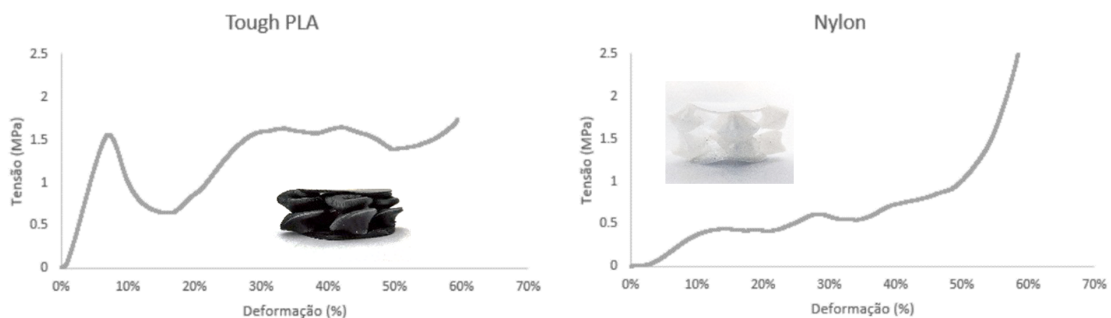


Figura 4.7: Gráficos tensão-deformação da estrutura "Círculos" nos diferentes materiais testados

Para o *nylon*, foi verificado um erro de design da estrutura. A zona de ligação entre os elementos demonstrou-se muito reduzida, por conseqüente não se verificou o colapso dos

elementos, mas sim um desvio dos mesmos, como ilustrado na figura 4.8. Os resultados destes testes foram muito importantes para a fase seguinte e permitiram efetuar evoluções em relação a este conceito.



Figura 4.8: Resultado do teste de compressão para o material *nylon*

Tabela 4.4: Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Círculos"

Material	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida [kg/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
<i>Tough PLA</i>	134.66	752.82	5.59
<i>Nylon</i>	123.83	315.57	2.55

De referenciar que a densidade apresentada por esta estrutura é muito superior aos valores do material utilizado nos capacetes. Contudo, apresenta valores de absorção de energia muitos elevados, o que compensa o aumento do peso. Tal como indicado pela última coluna da tabela, para o *tough PLA* a energia absorvida específica encontra-se dentro dos valores admissíveis em comparação aos resultados obtidos para o EPS.

Para o *nylon*, esta estrutura apresenta valores aquém do esperado. Apesar disso, serão realizadas alterações geométricas à estrutura nos dois materiais com o objetivo de otimizar e explorar a capacidade desta geometria para absorver energia.

4.5.2 Estrutura 2: Diamante Hexagonal

Os resultados dos testes de compressão realizados para a estrutura "Diamante Hexagonal" estão ilustrados na figura 4.9.

Para os espécimes em *tough PLA*, o gráfico inicia com um pico de $0.3MPa$, aproximadamente. Apesar de serem valores relativamente baixos, esta demonstrou-se promissora. À medida que as tensões aumentam, os elementos constituintes são colapsados por ordem e gradualmente, o que indica que a carga é distribuída corretamente ao longo da estrutura e poderá ser um modelo ideal para esta aplicação.

No gráfico da direita, é possível verificar a flexibilidade do *nylon* em comparação com o *tough PLA*. Todavia, a curva é bastante suave o que implica que a compressão foi gradual e sem quebra abrupta dos elementos constituinte. É ainda possível verificar no final do gráfico um pico, que indica a quebra dos últimos elementos em contacto com base da estrutura.

Com a tabela é possível observar que os valores da energia absorvida específica são relativamente baixos o que leva a elementos frágeis que necessitam de algum reforço.

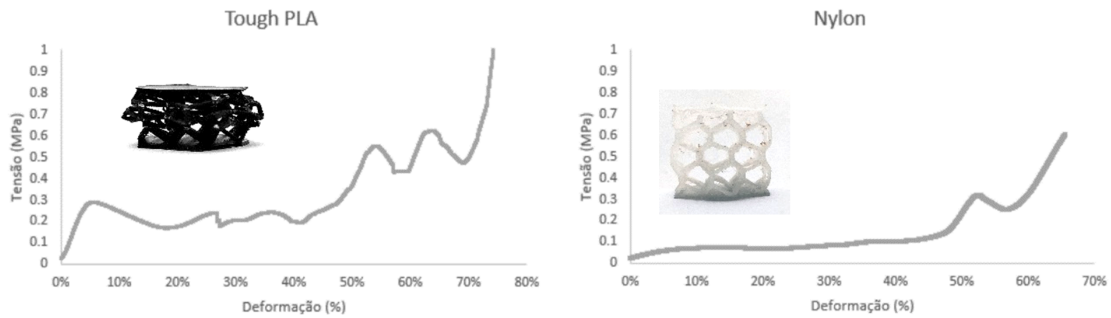


Figura 4.9: Gráficos tensão-deformação da estrutura "Diamante Hexagonal" nos diferentes materiais testados

Tabela 4.5: Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Diamante Hexagonal"

Material	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida [kJ/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
<i>Tough PLA</i>	80.51	212.92	2.64
<i>Nylon</i>	74.23	55.58	0.75

Para isso existem duas opções: aumento do diâmetro dos elementos constituintes ou diminuição do tamanho dos elementos individuais.

4.5.3 Estrutura 3: Mola

Tal como as estruturas anteriores, a estrutura Mola foi testada em dois materiais distintos e as curvas tensão-deformação estão ilustradas na figura 4.10.

Para o material *tough PLA*, é possível verificar uma curva suave ao longo da compressão. Assim como no design anterior, o comportamento da estrutura mola revelou um colapso gradual dos elementos. Todavia, os valores de tensão são muito abaixo do esperado.

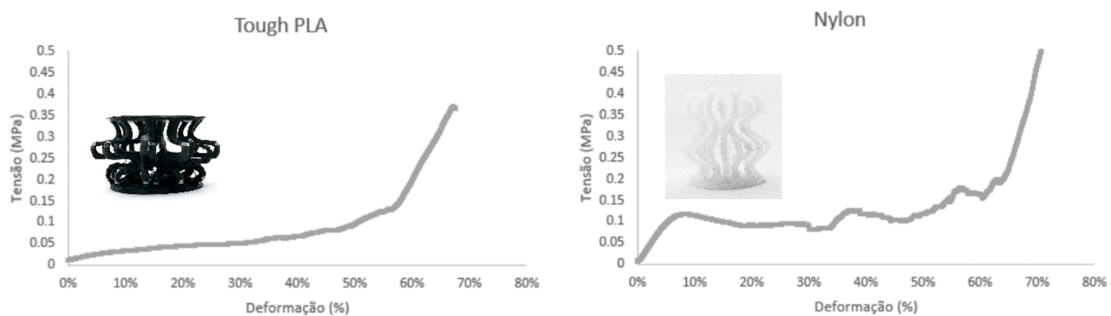


Figura 4.10: Gráficos tensão-deformação da estrutura "Mola" nos diferentes materiais testados

Para a estrutura obtida em *nylon*, o gráfico apresenta um ligeiro aumento da tensão, entre $0.10 - 0.15 MPa$. Valores muito inferiores ao necessário para cumprir os requisitos

mínimos de absorção de energia. Algumas irregularidades presentes, correspondem a fraturas que ocorreram dos elementos constituintes.

Com o aumento da deformação, a célula de carga continuou a colapsar, acabando por fraturar os elementos constituintes. Graficamente, resulta nas irregularidades visíveis ao longo da curva.

Tabela 4.6: Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "Mola"

Material	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida [kJ/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
<i>Tough PLA</i>	76.36	43.69	0.57
<i>Nylon</i>	70.23	39.79	0.57

O facto de os elementos constituintes estarem ligados apenas ao topo e à base, não dispendo de qualquer tipo de ligação entre eles, demonstrou instabilidade e fragilidade da estrutura.

Deste modo, a estrutura mola revelou uma fraca capacidade de absorção de energia.

4.5.4 Estrutura 4: BCC

Esta configuração apresenta um arranjo das células unitárias bastante simples e estável. A figura 4.11 apresenta as curvas tensão-deformação dos testes realizados.

Para o *tough PLA*, múltiplas células unitárias quebraram-se de uma só vez por não existir qualquer suporte, vertical ou horizontal, o que impede a quebra das camadas gradualmente. Por conseguinte, o comportamento de rutura desta configuração é muito imprevisível.

Após a quebra aleatória de algumas células, o material é colapsado sobre as camadas inferiores, tornando-a novamente rígida. Isto resulta nos picos presentes na curva.

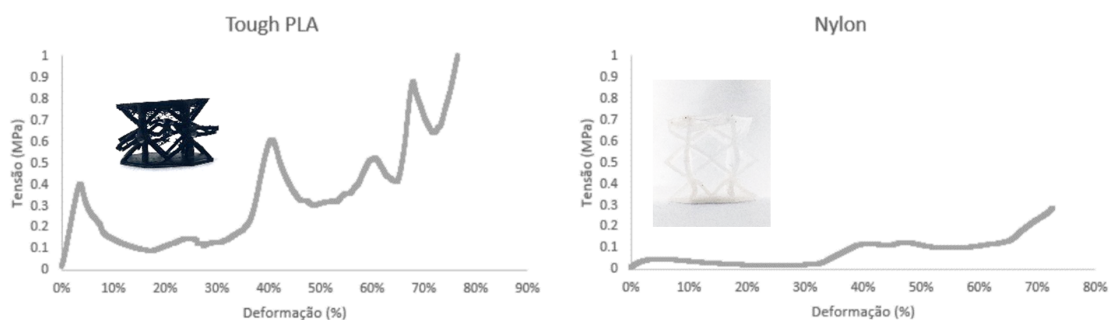


Figura 4.11: Gráficos tensão-deformação da estrutura "BCC" nos diferentes materiais testados

Para o *nylon*, a curva apresentada demonstra valores muito inferiores aos desejados. O que torna a estrutura "BCC" incompatível com absorção de energia.

Para a estrutura "BCC", assim como na estrutura "Mola", os valores da energia absorvida específica estão abaixo dos valores admissíveis quando comparados com os exemplares

Tabela 4.7: Dados resultantes de testes realizados à compressão da estrutura "BCC"

Material	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida [kJ/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
Tough PLA	64.93	86.33	1.33
Nylon	59.71	41.27	0.69

testados do material EPS. Antes ser testada a estrutura demonstrou-se estável e de fácil arranjo, contudo, após testada a imprevisibilidade demonstrada ao longo dos vários testes realizados foram o motivo pelo qual esta estrutura não será otimizada e não passará à próxima fase.

4.6 Evoluções realizadas

Após a primeira fase de eliminação das estruturas apresentadas estar concluída, alguns ajustes e evoluções foram realizados baseados nos testes experimentais efetuados anteriormente. Escolhidas as duas estruturas que apresentaram melhores resultados, "Círculos" e "Diamante Hexagonal", prosseguiu-se para a segunda fase.

4.6.1 Estrutura 1: Círculos

Esta estrutura sofreu um aumento da área de contacto entre os elementos que, consequentemente, levou a um aumento do diâmetro da estrutura.

Também foi alterada a união entre elementos, inicialmente os elementos eram isolados, isto é, cada elemento continha dentro de si uma bolsa de ar. Após revisão, o aumento da área de contacto permitiu fazer uma ligação das bolsas de ar com o intuito de realizar uma compressão mais suave.

Na figura 4.12 estão apresentados os *sketches* da versão original e da versão otimizada, respetivamente.

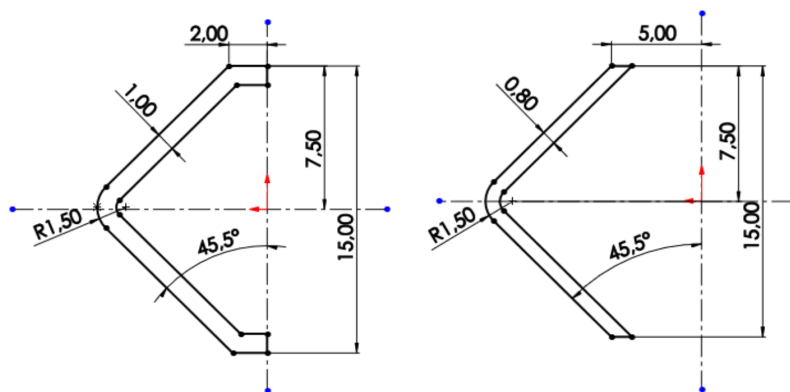


Figura 4.12: Ilustração das alterações realizadas na estrutura "Círculos"

Com a diminuição de espessura de parede de 1.0mm para 0.8mm resultou uma ligeira diminuição da massa dos elementos bem como uma diminuição da densidade, surgindo assim uma solução inicial.

Mesmo após estas alterações os valores da densidade, para os dois materiais utilizados, permanecem muito elevados quando comparados com os resultados do material EPS.

Com isto em mente, foram estudadas e avaliadas soluções relativas ao arranjo circular desta estrutura. A solução passou por remover os elementos centrais presentes na disposição inicial, ou seja, a estrutura numa primeira fase continha 6 colunas constituídas por dois elementos cada, perfazendo um total de 12 elementos individuais.

Na figura 4.13 está apresentada a nova versão para esta estrutura com 10 elementos.

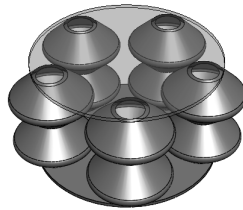


Figura 4.13: Apresentação da versão otimizada da estrutura "Círculos"

Para verificação destas alterações, dois modelos em *tough* PLA e dois em *nylon*, foram impressos e testados. Os resultados, apresentados em curvas tensão-deformação, estão ilustrados nos gráficos seguintes:

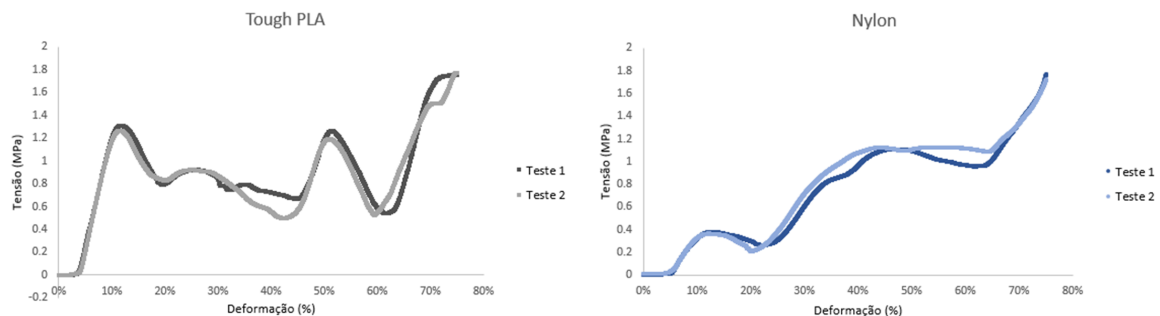


Figura 4.14: Gráficos tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Círculos"

À primeira vista, a diminuição da espessura de parede resultou em valores de tensão mais baixos, o que seria de esperar visto que é necessária uma menor força para quebrar o equilíbrio da estrutura.

No gráfico dos modelos impressos em *nylon*, o aumento da área de contacto resultou numa zona de deformação alongada, que revelou um aumento da energia absorvida comparativamente à versão original da estrutura em questão. Todavia, no início da compressão, as tensões baixas apresentadas demonstram a flexibilidade do material.

Numa visão detalhada dos resultados, observa-se um bom desempenho ao nível da energia absorvida, porém existe uma outra característica de elevada importância, a densidade. Comparando um capacete com este design e um capacete de espuma expansiva EPS, é de notar um aumento do peso em cerca de 10 vezes, o que recai num contra, visto que, para o utilizador, o peso do capacete é um requisito com elevada importância.

Tabela 4.8: Dados resultantes de testes realizados à versão otimizada da estrutura "Círculos"

Material	Densidade [kg/m^3]	Energia Absorvida [kJ/m^3]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
<i>Tough</i> PLA	149.21	509.97	3.42
<i>Nylon</i>	137.14	453.96	3.30

4.6.2 Estrutura 2: Diamante Hexagonal

A diminuição dos elementos individuais não se demonstrou uma opção válida visto que para o mesmo volume seriam necessários mais elementos, o que resulta num aumento de densidade.

Como solução alternativa, foi realizado um estudo que consiste na variação de diâmetro dos elementos barra. As variações foram realizadas com acréscimos de $0.2mm$.

Com recurso ao *software* de modelação, foi exequível o cálculo da massa e do volume dos modelos de modo a ter controlo da densidade. Com o peso a ser um fator fundamental para o avanço da escolha da melhor estrutura, foi estipulado um limite máximo de $100kg/m^3$. A tabela 4.9 apresentada indica os dados obtidos.

Tabela 4.9: Dados resultantes de testes realizados à versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal"

Diâmetro \emptyset [mm]	Material	Massa [g]	Volume [cm^3]	Densidade [g/cm^3]	Densidade [kg/m^3]
2.0	<i>Tough</i> PLA	2.18	27.0762	0.08051	80.51
2.2		2.61		0.09639	96.39
2.4		3.07		0.11338	113.38
2.0	<i>Nylon</i>	2.01		0.07423	74.23
2.2		2.40		0.08864	88.64
2.4		2.82		0.10415	104.15

Com um diâmetro de barra acima de $2.2mm$, os espécimes ultrapassam o limite estipulado sendo que a opção final será entre elementos com $2mm$ e $2.2mm$ de espessura.

A curva tensão-deformação dos testes realizados para o *nylon* estão ilustrados no gráfico 4.15.

Para densidades relativamente baixas, os espécimes impressos em *nylon* permanecem insuficientes no que diz respeito à absorção de energia.

Para o material *tough* PLA, é notório o aumento da tensão para quebrar os primeiros elementos desta estrutura. Este material é característico de ser quebradiço, todavia é possível obter uma área abaixo da curva superior ao *nylon*.

Algumas irregularidades presentes no gráfico resultam do colapso gradual da estrutura que, com o acumular de material, levam a uma densificação também gradual.

Os resultados obtidos deste estudo estão apresentados na tabela 4.10.

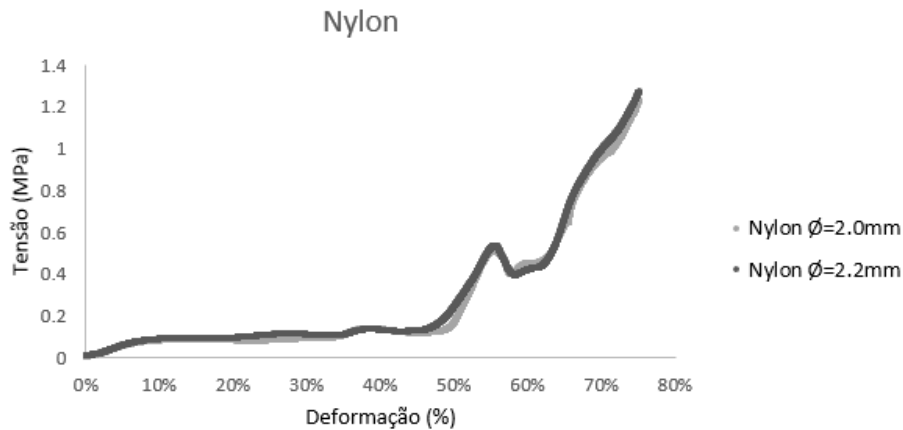


Figura 4.15: Gráfico tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal" para o material *nylon*

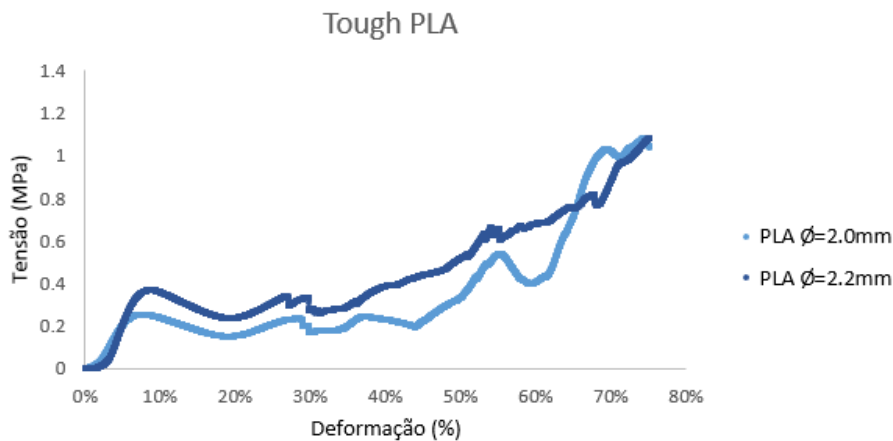


Figura 4.16: Gráfico tensão-deformação da versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal" para o material *tough PLA*

Tabela 4.10: Tabela resumo dos resultados obtidos dos ensaios realizados à versão otimizada da estrutura "Diamante Hexagonal"

Diâmetro \varnothing [mm]	Material	Densidade [kg/m ³]	Energia Absorvida [kJ/m ³]	Energia Absorvida Específica [kJ/kg]
2.0	<i>Tough PLA</i>	80.51	165.70	2.06
2.2		96.39	234.90	2.44
2.0	<i>Nylon</i>	74.23	106.40	1.43
2.2		88.64	111.77	1.26

Apesar de terem sido realizados vários testes, os valores de energia absorvida específica permanecem muito inferiores, seria de esperar valores entre 4 e 7kJ/kg. Deste estudo resulta que, as estruturas em *tough PLA* apresentam melhores características de absorção de energia.

Após a apresentação dos dados experimentais, a estrutura com melhores características de absorção de energia é a estrutura 1, designada de "Círculos". Porém, os valores de densidade obtidos tornam este design inexecutável para aplicação em capacetes de ciclismo.

Como alternativa, a estrutura "Diamante Hexagonal", com densidade de $96.39\text{kg}/\text{m}^3$, foi a escolha a integrar na modelação do capacete. No entanto, seria de esperar uma maior absorção de energia para esta estrutura se demonstrar competitiva com as espumas EPS. Posteriormente, após a realização dos testes práticos, comprovou-se a veracidade desta afirmação.

Capítulo 5

Projeto para fabrico aditivo

5.1 Levantamento de forma

O capacete em estudo foi digitalizado de modo a obter um modelo CAD da geometria através do *scan* de um modelo físico em EPS.

Este modelo físico servirá de base para o desenvolvimento do modelo digital e posteriormente para os modelos impressos com recurso à tecnologia de produção aditiva FDM. Sendo visível a sua representação na figura 5.1.



Figura 5.1: Modelo base no material EPS

Com uma tecnologia de fabrico avançada, a tecnologia de engenharia inversa pode ser utilizada para melhorar e inovar os modelos de produtos existentes [34].

O processo de obtenção do modelo do capacete para este estudo pode ser dividido em 3 etapas fundamentais: aquisição e processamento de dados obtidos por *scan* do modelo físico, modelação e transformação do modelo físico em modelo digital e, por último, fabrico de modelos com recurso a produção aditiva.

Após a escolha do modelo físico a estudar, foi realizada o *scan* do produto com recurso a um equipamento de digitalização 3D servindo-se de luz estruturada para realizar o levantamento de forma.

Para este efeito foi utilizado um *scanner* da marca *Thor3D* [35]. O modelo *Calibry*, figura 5.2, tem capacidade de capturar nuvens de pontos com precisão máxima de $0.1mm$ e uma resolução de $0.6mm$, permite capturar todos os detalhes das superfícies. Com recurso ao software *Calibry Nest*, foi possível converter a nuvem de pontos numa malha constituída por triângulos e visualizar, em tempo real, todos os passos necessários para ser obtido um *scan* de qualidade.



Figura 5.2: *Scanner* com feixe de luz estruturada, *Calibry* (<https://thor3dscanner.com/en/products/>)

Foi realizado o *scan* de apenas meio capacete, visto ser difícil obter o modelo do capacete como um todo. Detetaram-se algumas limitações com o uso do *scan* com feixe de luz, nomeadamente sombras que impossibilitaram a conversão para modelo digital. Para solucionar este defeito optou-se por cortar o capacete em EPS e com isso possibilitar, com maior precisão, o *scan* do mesmo.

Após importar os dados para o *software* 3D (*SolidWorks*) com a utilização do *add-in: Scan to 3D*, foi possível trabalhar os dados recolhidos e otimizar a malha de modo a obter um modelo do produto adequado, como visível na figura 5.3.

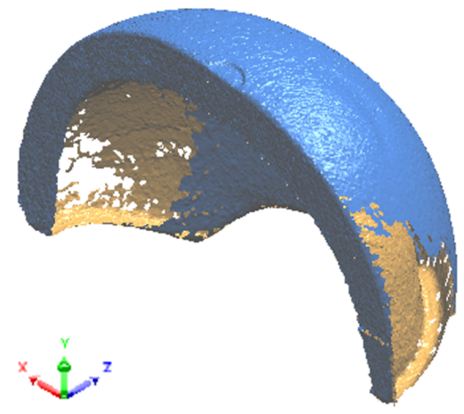


Figura 5.3: Ilustração da malha obtida do levantamento de forma

O próximo passo é evoluir, modelar e transformar o modelo físico em digital. De modo a facilitar a modelação e os passos seguintes foi definida a orientação da malha de acordo com os eixos de coordenadas XYZ.

O comando *Curve Wizard* permite realizar o *slicing* da malha e a obtenção das linhas de contornos da mesma em 3 direções para ser obtido um menor desvio possível em relação ao modelo físico.

Na figura seguinte cada cor representa a respetiva orientação dos *sketches* de acordo com o referencial indicado.

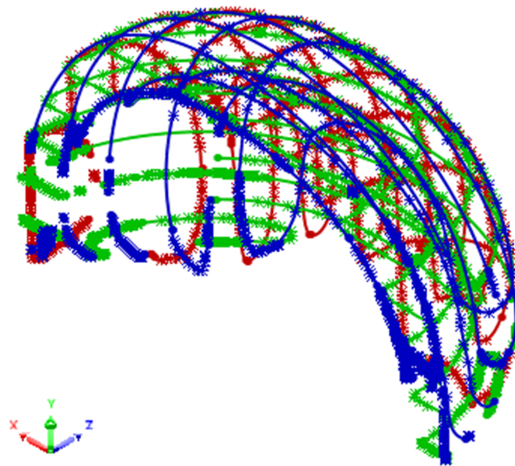


Figura 5.4: Ilustração os *sketches* extraídos da malha

Com a criação dos *sketches*, foi possível obter superfícies limpas e com o mínimo ruído possível, para tal foram criadas as superfícies através do comando *Boundary Surface*.

Após o estudo do capacete, e tentando manter a modelação simples e prática, o capacete digital foi obtido através da união de três superfícies. Sendo estas: Superfície exterior, interior e de ligação de apenas meio capacete, todas perceptíveis na figura 5.5.

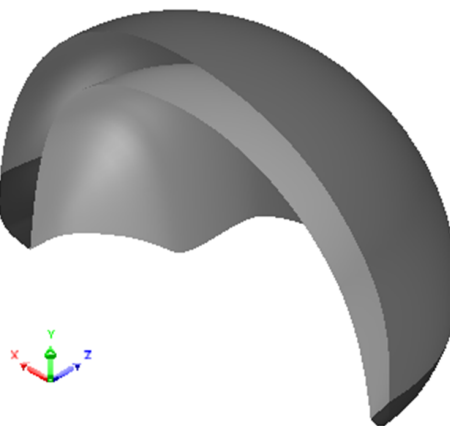


Figura 5.5: Ilustração das superfícies geradas com recurso ao levantamento de forma

De seguida foi traçado um plano intermédio para realizar o espelho e obter um modelo completo. Com a obtenção de apenas meio capacete, foi necessário confirmar as cotas com o modelo físico de modo a prosseguir para o modelo digital com a menor percentagem de desvios dimensionais.

Para dar como finalizada esta fase de modelação falta apenas aplicar uma espessura de 1mm para converter o modelo casca em modelo 3D e permitir aplicar as estruturas *lattice*, a serem desenvolvidas, como *infill* do capacete.

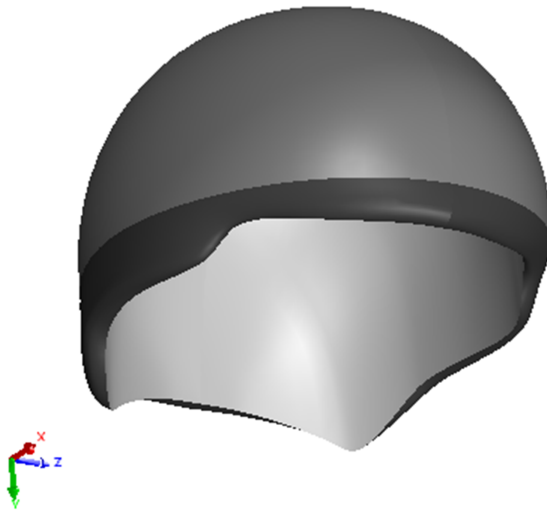


Figura 5.6: Apresentação do modelo completo obtido por superfícies

De modo a completar as 3 etapas anteriormente referidas e avançar para o fabrico de modelos com recurso a impressão 3D, é necessário desenvolver e testar diferentes estruturas, bem como incorporar a que alcançar os melhores valores para absorção de energia.

5.2 Aplicação da estrutura "Diamante Hexagonal"

Após a seleção da geometria a integrar a modelação do capacete, vem a fase de completar a modelação do protótipo virtual. Esta etapa permite visualizar e otimizar a orientação da estrutura "Diamante Hexagonal" com o objetivo de obter o melhor detalhe e precisão do modelo. A figura 5.7 apresenta a versão final do capacete.

Posto isto, é gerado o modelo em malha de triângulos e exportado o produto final no formato normalizado, ficheiro .STL.

Com recurso a um *software* de seccionamento, neste caso foi empregue o *Ultimaker Cura*. O modelo do capacete concebido é importado, disposto no centro da mesa de trabalho e definidos os parâmetros de impressão.

Antes de serem definidos os parâmetros de impressão é fundamental avaliar o equipamento de impressão FFF 3D que se pretende empregar. Presente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), a impressora *Ultimaker S5* foi o equipamento utilizado.

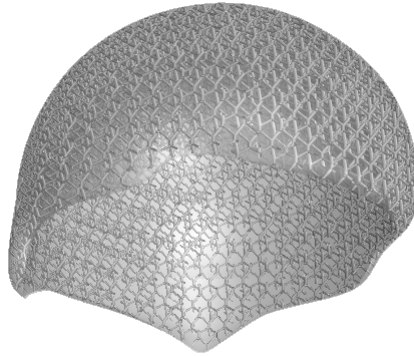


Figura 5.7: Apresentação da incorporação da estrutura "Diamante Hexagonal" no modelo digital do capacete

Tabela 5.1: Definição de parâmetros de impressão 3D

Item	Velocidade de impressão	Temperatura de impressão	Temperatura da mesa de trabalho	Material utilizado	Diâmetro do filamento
Valor	70 mm/s	200 °C	60 °C	Tough PLA	2.85 mm

Dispõe de um volume de trabalho de $330 \times 240 \times 300 \text{mm}$ e duas cabeças extrusoras de 0.4mm de diâmetro. Esta impressora provou ser uma boa opção para a continuação deste projeto, integrando uma resolução de camada na ordem dos $20 \mu\text{m}$.

Seguidamente, é realizada a divisão do capacete em secções 2D. Estas secções são designadas de camadas e podem variar de espessura consoante a precisão desejada.

Com uma altura de camada de 0.1mm , é pretendida a obtenção do modelo com elevada precisão com o propósito de obter as estruturas integrantes com melhor detalhe possível, no entanto, constará de um elevado tempo de impressão.

Os principais parâmetros utilizados estão apresentados na tabela 5.1.

5.3 Estudo das orientações de fabrico

Um importante parâmetro do fabrico aditivo é a orientação de sobreposição das camadas. Para averiguar, foi realizado um estudo sobre qual a melhor solução consoante a qualidade de impressão e o acabamento obtido. A figura 5.8 apresenta duas secções retiradas do protótipo digital e disposta no *Ultimaker Cura* para posterior impressão.

Os elementos constituintes permitem apenas uma disposição com variação de 180° . Qualquer outra disposição implicaria a utilização de material de suporte para a impressão da estrutura "Diamante Hexagonal" que não seria possível de remover após impressão total do capacete.

Após impressas, as duas amostras passaram pela fase de remoção do material de suporte, ilustrado a azul, e como acabamento foram utilizadas duas lixas com diferentes grão. Foi possível constatar que a disposição apresentada à esquerda na figura 5.8, permite a remoção dos suportes com maior facilidade e um pós-processamento mais simplificado.

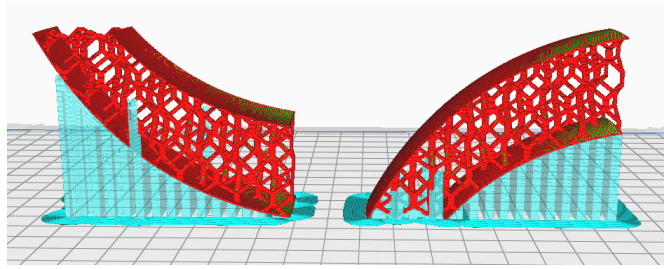


Figura 5.8: Ilustração do estudo das orientações realizado com recurso ao *software Ultimaker Cura*

Seguidamente, ao aplicar a melhor orientação ao capacete na sua totalidade, para além de ser obtido um melhor acabamento, esta requer uma menor quantidade de material de suporte base, refletindo num menor tempo de impressão é requerido.

5.4 Fabrico aditivo

Com o modelo preparado para impressão, é extraído o código G e introduzido na impressora 3D. O tempo de impressão estipulado foi de 4 dias e 20 horas, perfazendo um total de 116 horas. Valor este justificável pela grande dimensão do modelo e a elevada precisão requerida. O estado do capacete após impressão é exibido na figura 5.9.

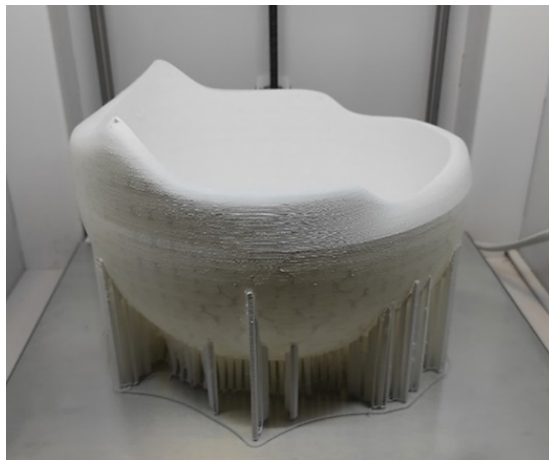


Figura 5.9: Apresentação do modelo físico do produto final

O resultado da impressão revelou-se muito satisfatório e o modelo físico obtido reflete verdadeiramente o conceito original.

Seguidamente, o modelo necessita de ser pós-processado, o que inclui a remoção do material de suporte e acabamento das superfícies. Para tal recorreu-se a uma lixa P220 para remoção de imperfeições resultantes dos suportes e a uma lixa P1200 com utilização de água de modo a reduzir abrasão e adicionar algum brilho ao modelo final.

Com a escolha da estrutura "Diamante Hexagonal" a integrar o capacete, foi obtida uma massa total de 244.84g, enquanto o modelo original em EPS tem uma massa de 89.92g.

Capítulo 6

Ensaaios de acordo com norma EN 1078

O caso de estudo, passa agora pela realização dos testes experimentais, em conformidade com a norma EN 1078, apresentada no Capítulo 3.4.

Dos diversos testes presentes na norma EN 1078, para este caso de estudo, foi realizado, somente, o teste de impacto. Este consiste em equipar os capacetes com a forma da cabeça de ensaio e realizar uma queda livre guiada que termina com o embate sobre uma bigorna plana fixada sobre uma superfície rígida. Contudo, ao realizar apenas o teste de impacto, a norma não permite a certificação do capacete.

Os dois capacetes apresentam massas diferentes que resultam numa discrepância da velocidade de impacto. Todavia, a norma apresenta alguns limites relativos aos testes de impacto, em específico os testes com recurso a bigorna plana.

Os ensaios não devem ultrapassar um pico máximo de aceleração (a_{max}) de 250 G e obter uma velocidade mínima de 5.42 m/s .

O teste de impacto foi realizado à temperatura ambiente e o modelo da cabeça utilizado é um modelo rígido em alumínio de tamanho M, este encontra-se especificado na tabela 3.1. A figura 6.1 apresenta o mecanismo utilizado nos testes de impactos a que os capacetes foram submetidos.

Foi aplicada uma altura de 172 cm correspondente à altura que ambos os capacetes seriam libertados, estando sujeitos apenas à gravidade ($g=9.81 m/s^2$) até ao impacto na bigorna. Esta altura foi aplicada de modo a assegurar que a velocidade mínima exigida pela norma seria verificada.

Dos testes experimentais realizados foi possível obter um critério de avaliação de lesões na cabeça, designado de *Head Injury Criterion* (HIC).

Este é o método mais recorrente na investigação da segurança rodoviária. No entanto, este apenas se baseia no risco de lesões resultante da aceleração linear, não aplicado a lesões resultantes de impactos em diferentes direções.

Matematicamente, o HIC é um integral empírico, proposto pela *National Highway Traffic*



Figura 6.1: Ilustração do mecanismo utilizado para realização dos testes experimentais

Safety Administration (NHTSA), em 1972 [2]. Este critério é definido pela equação 6.1:

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (6.1)$$

Onde:

- $a(t)$ é a resultante da aceleração da cabeça no centro de massa do cérebro (neste caso do modelo da cabeça) (G);
- t_1 e t_2 são quaisquer dois pontos no tempo, durante o intervalo de impacto, em que o HIC é máximo.

A tabela 6.1 apresenta a correlação entre os valores de HIC e de *Abbreviated Injury Scale* (AIS) [36]. AIS, proporciona uma terminologia padronizada para descrever lesões e classifica as lesões por gravidade. É uma ferramenta internacionalmente aceite, onde a gravidade das lesões é dada através de uma escala que inicia 1 (menos grave) até 6 (mais grave) [36].

A qualidade do capacete é determinada medindo o gráfico de aceleração da cabeça durante o impacto e é expressa em termos de parâmetros de lesão: resultante máxima da aceleração translacional da cabeça (a_{max}) e critério de lesões da cabeça (HIC) [2].

Tabela 6.1: Valores de HIC e de AIS correspondentes (intervalo de 15ms) [2]

HIC (15ms)	AIS Code	Nível de concussão cerebral e de lesão na cabeça
135-519	1	Dores de cabeça ou tonturas
520-899	2	Inconsciente durante menos de 1 hora - Fratura linear
900-1254	3	Inconsciente durante 1-6 horas - Fratura com afundamento
1255-1574	4	Inconsciente durante 6-24 horas - Fratura aberta
1575-1895	5	Inconsciente mais de 24 horas - Hematoma grande
>1860	6	Não sobrevive

6.1 Resultados do teste de impacto

Através da análise da figura 6.2, o instante 1.5ms corresponde ao impacto do capacete entrar em contacto com a bigorna. Como se pode verificar, a aceleração do centro de gravidade do modelo de cabeça é nula até um determinado instante, seguido de um aumento da aceleração até ao seu valor máximo. Após o pico, os valores de aceleração começam a decrescer até o valor próximo da gravidade padrão.

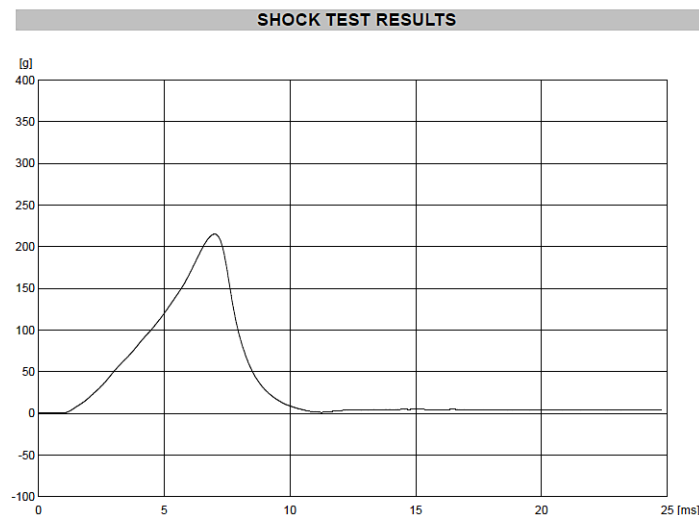


Figura 6.2: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo do ensaio realizado ao capacete obtido em EPS

A curva tensão-deformação apresentada no Capítulo 4.1, demonstra que o material EPS apresenta uma compressão gradual, resultado de uma distribuição uniforme da energia de impacto. O mesmo se verifica na figura 6.2, desde o instante 1.5ms, aproximadamente, até ao pico máximo, a curva apresenta um aumento de aceleração gradual, em relação ao tempo percorrido. O mesmo se verifica na fase de desaceleração, posterior ao pico de aceleração.

Infelizmente, o software certificado utilizado pela empresa, à qual se recorreu para realizar os testes de impacto, não permite a demonstração completa do gráfico.

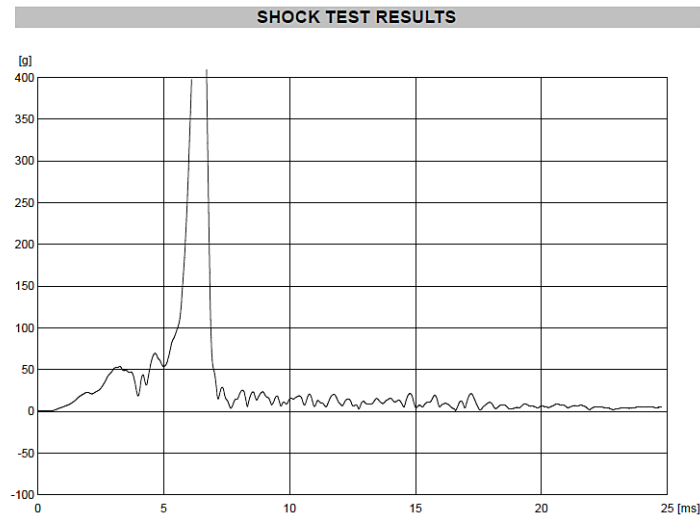


Figura 6.3: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo do ensaio realizado ao capacete obtido em *tough* PLA

No entanto, é possível verificar que a curva apresenta bastante ruído quando comparada com a curva do capacete EPS. De certa forma, seria de esperar diferentes picos que indicam o colapso gradual dos elementos constituintes da estrutura incorporada na fase de compressão. Após impacto, o sistema de fixação do capacete ao modelo de cabeça, composto por fivelas, não suportou o impacto. Este é o motivo pelo qual o gráfico após o pico obter tantas oscilações.

É importante salientar que o pico ultrapassa o valor máximo admitido pela norma. Porém, o pico ilustrado é resultado do modelo da cabeça e a bigorna plana entrarem em contacto. Consequentemente, na zona de impacto do capacete, ocorreu uma destruição total dos elementos integrantes.

Tabela 6.2: Valores de picos de aceleração e HIC dos ensaios experimentais

Tipo de Capacete	Massa (g)	Velocidade de impacto (m/s)	a_{max} (G)	HIC
EPS	89.92	5.48	215	1131
<i>Tough</i> PLA	244.84	5.51	713	5198

Para o modelo de capacete em EPS, o valor máximo de aceleração da cabeça durante o impacto verifica os limites estipulados pela norma, 215G. Deste teste é possível, de acordo com o valor obtido de HIC, que num impacto similar, o utilizador do capacete ficaria inconsciente entre 1-6 horas, relativo ao nível 3 indicado pela escala AIS.

Para o modelo de capacete obtido em *tough* PLA, o colapso total da camada intermédio, constituída por elementos da estrutura "Diamante Hexagonal", resultou num pico de aceleração muito superior ao limite aplicado pela norma. Com o valor de HIC, é possível verificar que o utilizador não sobreviveria a um impacto com o modelo de capacete desenvolvido.

Após os ensaios experimentais, o capacete em *tough* PLA, foi cortado a meio com o intuito de verificar o estado da estrutura após impacto. O resultado está ilustrado na figura 6.4.

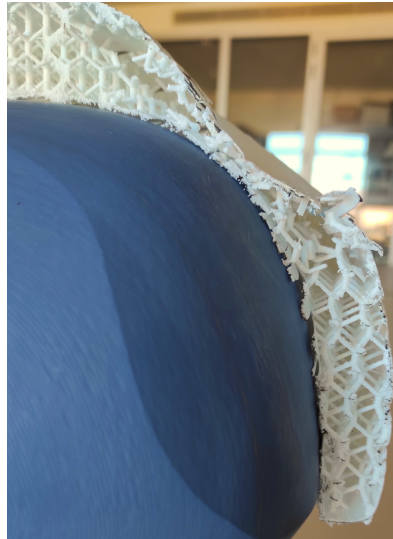


Figura 6.4: Apresentação do estado da estrutura dedicada à absorção de energia após teste de impacto

A localização do impacto é notória pela destruição total dos elementos. É possível verificar que a área de material destruído equivale ao diâmetro da bigorna plana utilizada, o que indica que a energia resultante do impacto não foi dispersa por uma área superior.

Apesar de todo o esforço realizado para ser obtido um capacete em impressão 3D capaz de verificar a norma EN 1078, para testes de impacto apenas, os resultados obtidos não permitiram a verificação do mesmo.

Capítulo 7

Discussões gerais

Para validação e certificação de protótipos de capacetes, estes têm de passar uma série de testes impostos pela norma EN1078 [1]. Dos diversos requisitos presentes, o foco foram os testes de impacto, demandando comprovar que os ensaios não ultrapassam um pico máximo de aceleração de $250G$, e, contiguamente, atinjam uma velocidade mínima de 5.42m/s .

Nas condições referidas, o modelo em EPS, com uma massa de $89.92g$, obteve um pico de aceleração máximo de $215G$. Os resultados obtidos por este modelo eram expectáveis visto que este é já comercializado.

Por sua vez, o modelo obtido por FDM, constituído na sua totalidade por *tough* PLA, apresentou uma massa de $244.89g$. Porém, não foi possível a sua validação tendo em conta que este modelo atingiu um pico máximo de $713G$, excedendo largamente o máximo permitido.

O modelo Hexr, apresentado no caso de estudo, é aquele que ostenta maior massa, $344g$. De acordo com a empresa, no decorrer dos testes foi obtido um máximo de aceleração linear de $144G$. Sendo este capacete indicado como líder nas credenciais de segurança de mercado, providencia ao utilizador 26% mais proteção do que um capacete convencional [31].

Durante a realização experimental, denotaram-se três parâmetros essenciais para a validação do projeto, nomeadamente, o processo de fabrico, a massa associada e o cumprimento da norma.

Em relação ao primeiro fator, a incorporação de tecnologias de FA, no desenvolvimento deste trabalho, permitiu uma maior liberdade no design e na construção das estruturas dedicadas à absorção de energia. Em contrapartida, o processo de fabrico do modelo em EPS está restrito à variação da densidade. Naturalmente, as características intrínsecas a cada processo levam a tempos de produção bastantes díspares.

Desta forma, é também importante explorar outros processos para obtenção do capacete podendo o SLS ser uma solução. Apesar da importância dos três fatores apresentados para os testes, tem de se ter em consideração que este equipamento de proteção passiva está em contacto com o utilizador, sendo assim a ergonomia é também um fator crucial.

Neste contexto, foi tomada uma especial atenção à massa. Relativamente aos modelos produzidos por FA, quando comparados com o de EPS apresentam valores de massa bastante superiores. Isto pode constituir uma série de desvantagens tornando o seu uso desgastante e desconfortável para o utilizador. No entanto, apesar de mais pesados podem ser facilmente ajustados às dimensões do cliente, melhorando assim o conforto.

Em suma, o capacete desenvolvido não obteve aprovação. Todavia, o caso de estudo *Herr*[31], demonstra que existe a possibilidade de, num futuro próximo, estruturas complexas integrarem a camada do capacete responsável pela absorção de energia.

Por último, salvaguardando novamente a importância da estrutura celular na absorção de impacto e consequente cumprimento da norma demonstra-se o seguinte ponto. À partida, supondo que quanto maior a massa maior a velocidade de impacto nos testes estabelecidos, seria justificável que o modelo de capacete *Herr* estivesse sujeito a forças de impacto superiores. Contudo, a utilização de estruturas celulares cumpriu decididamente o seu propósito, tendo sido o capacete com maior massa aquele que apresenta o menor valor de aceleração linear e ainda melhor desempenho que o modelo em EPS.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos futuros

8.1 Conclusões

O trabalho consistiu no desenvolvimento de estruturas celulares cuja função primária é a absorção de energia aquando o impacto. Em prol do estudo da sua aplicação, foi selecionado um capacete de ciclismo como modelo base, inteiramente produzido em EPS.

Este modelo revelou-se ser um grande desafio, pois a relação entre a densidade e a capacidade de absorção de energia é realmente elevada e, conseqüentemente, difícil de igualar.

De um modo global, pode-se concluir que o objetivo principal da dissertação não foi alcançado na sua plenitude, uma vez que as estruturas desenvolvidas não conseguiram cumprir os requisitos presentes na norma em vigor. Não obstante, foi realizado um desenvolvimento bastante significativo no design de estruturas estocásticas.

Mediante os resultados extraídos experimentalmente, comprovaram-se dois factos preponderantes. Primeiramente, evidencia-se o melhor desempenho da estrutura "Círculos" na absorção de energia, todavia, apresenta maior densidade, conferindo-lhe a maior massa. Em segundo, a estrutura "Diamante Hexagonal", quando testada, colapsou por ordem e gradualmente, indicativo de que a carga é distribuída uniformemente, embora tenha revelado uma menor capacidade de absorção de energia.

Decorridos os ensaios experimentais das duas estruturas otimizadas, a estrutura "Círculos" perdura com as melhores características de absorção de energia, no entanto, a densidade apresentada torna este design inexequível para aplicação no modelo de estudo, devido a fatores ergonómicos. Por sua vez, a estrutura "Diamante Hexagonal", assumiu-se como a alternativa a adotar.

Em suma, o modelo de capacete em EPS, demonstra um valor máximo de aceleração do centro de gravidade da cabeça que se enquadra dentro do limite definido pela norma. Apesar do progresso decorrido ao longo desta dissertação, o protótipo obtido em *tough* PLA não cumpriu com os requisitos implícitos pela norma reguladora.

8.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros propõe-se o estudo da aplicação de densidade variável nos elementos dedicados à absorção de energia.

A obtenção de uma distribuição uniforme da energia resultante do impacto, a realização de ensaios quasi-estáticos e ensaios de impacto no estudo de geometrias é pertinente.

Recorrer a materiais mais complexos que permitam a validação do capacete em todos os testes implementados e não apenas no teste de impacto. Com a utilização de termoplásticos, como o *tough* PLA, é necessário recorrer a um tratamento térmico que permita o capacete ser submetido a condições de temperatura $(+50 \pm 2)^\circ C$ e $(-20 \pm 2)^\circ C$, como estabelecido pela norma reguladora.

Bibliografia

- [1] CEN. EN 1078:2012+A1:2012 - Helmets for pedal cyclists and for users of skateboards and roller skates, 2012.
- [2] Daniel Gonçalves. *Segurança passiva de capacetes rodoviários utilizando novos materiais*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [3] Carlos Relvas. *O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*. 2018. ISBN 9789898927026. URL www.quanticaeditora.pt.
- [4] ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology, 2015. URL <https://www.iso.org/standard/69669.html>.
- [5] Ben Redwood, Filemon Schffer, Brian Garret, and B Igor. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Number c. 2017. ISBN 9082748509.
- [6] Wenjin Tao and Ming C. Leu. Design of lattice structure for additive manufacturing. In *2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*, pages 325–332. IEEE, aug 2016. ISBN 978-1-5090-3467-3. doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/7790182/>.
- [7] Wei Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, and Pablo D. Zavattieri. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*, 69:65–89, 2015. ISSN 00104485. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [8] K. Satish Prakash, T. Nancharaih, and V. V.Subba Rao. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2): 3873–3882, 2018. ISSN 22147853. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.642. URL <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>.
- [9] Richard J.M. Hague. Unlocking the Design Potential of Rapid Manufacturing. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*, pages 5–18, 2006. doi: 10.1002/0470033991.ch2.
- [10] Sheng Yang and Yaoyao Fiona Zhao. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4):327–342, sep 2015. ISSN 0268-3768. doi: 10.1007/s00170-015-6994-5. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-6994-5>.

- [11] Nathan Decker and Albert Yee. A simplified benchmarking model for the assessment of dimensional accuracy in FDM processes. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(2):145, 2015. ISSN 1757-8817. doi: 10.1504/ijrapidm.2015.073573.
- [12] Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrihu Ahuja, and Filomeno Martina. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2):737–760, 2016. ISSN 17260604. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850616301913>.
- [13] Harm Jan Steenhuis and Leon Pretorius. The additive manufacturing innovation: A range of implications. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(1): 122–143, 2017. ISSN 1741038X. doi: 10.1108/JMTM-06-2016-0081.
- [14] Thomas Campbell, Christopher Williams, Olga Ivanova, and Banning Garrett. Could 3D Printing Change the World? *Atlantic Council*, page 16, 2011. URL <http://www.atlanticcouncil.org/publications/reports/could-3d-printing-change-the-world>.
- [15] Malte Gebler, Anton J.M. Schoot Uiterkamp, and Cindy Visser. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74(C):158–167, 2014. ISSN 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.
- [16] Syed A.M. Tofail, Elias P. Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O’Donoghue, and Costas Charitidis. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1): 22–37, 2018. ISSN 18734103. doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001. URL <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- [17] Ian Gibson, David Rosen, and Brent Stucker. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*. Springer New York, New York, NY, second edition, 2015. ISBN 9781493921133. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- [18] Mohammad Vaezi, Srisit Chianrabutra, Brian Mellor, and Shoufeng Yang. Multiple material additive manufacturing - Part 1: A review:, 2013. ISSN 17452759.
- [19] Abdul Hadi Azman. Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing. *Hal*, page 164, 2017.
- [20] Patrick Pradel, Zicheng Zhu, Richard Bibb, and James Moultrie. Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice. *Journal of Engineering Design*, 29(4-5):165–200, may 2018. ISSN 14661837. doi: 10.1080/09544828.2018.1454589. URL <https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1454589><https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09544828.2018.1454589>.
- [21] Martin Kumke, Hagen Watschke, and Thomas Vietor. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*,

- 11(1):3–19, jan 2016. ISSN 1745-2759. doi: 10.1080/17452759.2016.1139377. URL <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1139377>.
- [22] Abdullah Alfaify, Mustafa Saleh, Fawaz M. Abdullah, and Abdulrahman M. Al-Ahmari. Design for additive manufacturing: A systematic review. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19):7936, sep 2020. ISSN 20711050. doi: 10.3390/SU12197936. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/7936>.
- [23] Shahroz Khan and Muhammad Junaid Awan. A generative design technique for exploring shape variations. *Advanced Engineering Informatics*, 38:712–724, 2018. ISSN 14740346. doi: 10.1016/j.aei.2018.10.005. URL <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.10.005>.
- [24] Marco Hemmerling and Ulrich Nether. Generico: A case study on performance-based design. (April):126–129, 2014. doi: 10.5151/despro-sigradi2014-0021.
- [25] Evangelos Tyflopoulos, David Tollnes Flem, Martin Steinert, and Anna Olsen. State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. *Proceedings of NordDesign: Design in the Era of Digitalization, NordDesign 2018*, pages 1–15, 2018.
- [26] Germain Sossou, Frédéric Demoly, Ghislain Montavon, and Samuel Gomes. An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1):3–18, jan 2018. ISSN 2288-5048. doi: 10.1016/j.jcde.2017.11.005. URL <https://academic.oup.com/jcde/article/5/1/3/5732389>.
- [27] Yunlong Tang, Jean Yves Hascoet, and Yaoyao Fiona Zhao. *Integration of topological and functional optimization in design for additive manufacturing*, volume 1. 2014. ISBN 9780791845837. doi: 10.1115/ESDA2014-20381.
- [28] BOA. Boa Technology Inc., 2021. URL <http://www.boafit.com/en-gb/>.
- [29] MIPS. Safety for helmets, 2021. URL <https://mipsprotection.com/>.
- [30] WaveCel. WaveCel Technology, 2021. URL <https://wavecel.com/technology>.
- [31] Hexr. The World’s First Custom Fit Helmet, 2021. URL <https://hexr.com/>.
- [32] Luca Di Landro, Giuseppe Sala, and Daniela Olivieri. Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets. *Polymer Testing*, 21(2):217–228, 2002. ISSN 01429418. doi: 10.1016/S0142-9418(01)00073-3. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941801000733>.
- [33] F. Fernandes. *Biomechanical analysis of helmeted head impacts: novel materials and geometries*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2017.
- [34] Pengwen Wang, Jing Yang, Yanan Hu, Jiaofei Huo, and Xiaoyang Feng. Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing. *Alexandria Engineering Journal*, 60(3):3445–3453, jun 2021. ISSN 11100168. doi: 10.1016/j.aej.2021.02.006. URL <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.006><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110016821000776>.
- [35] Thor3D. Calibry 3D scanner, 2021. URL <https://thor3dscanner.com/en/>.

- [36] AAAM. Abbreviated injury scale. URL <https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/>.