



**João Diogo
Simões Guido**

**Desenvolvimento de sola de sapatilha com
utilização do fabrico aditivo para absorção de
energia do impacto**



**João Diogo
Simões Guido**

**Desenvolvimento de sola de sapatilha com
utilização do fabrico aditivo para absorção de
energia do impacto**

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

Este trabalho teve o apoio financeiro de: Projetos de Investigação do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA) com referências UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020; e Projeto Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA) Infraestrutura de Investigação com referência CENTRO-01-0145-FEDER-022083.

O júri

Presidente

Professor Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente Principal

Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do
Instituto Politécnico de Leiria

Vogal - Orientador

Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro lugar, deixo o meu agradecimento ao Professor Doutor António Ramos e ao Professor Doutor Carlos Relvas, professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e orientadores desta dissertação, pela disponibilidade, orientação e contribuição de conhecimento, assim como pela compreensão e motivação ao longo deste trabalho.

Deixo também o meu profundo agradecimento a todos os professores da Universidade de Aveiro que fizeram parte do meu percurso académico.

Agradeço ainda aos meus amigos de sempre pelo apoio e companheirismo, pelas palavras de incentivo e pela amizade.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus pais, José e Cristina, e à minha irmã, Joana. Foram sem dúvida essenciais neste caminho pelo suporte incondicional e carinho. Obrigado por estarem sempre ao meu lado!

Palavras-chave

Fabrico aditivo; Estruturas de treliça; Absorção de energia; Sola de Sapatilha; Entressola

Resumo

O calçado tem um papel fulcral no dia-a-dia tanto de atletas de alta competição como do cidadão comum, durante a prática de exercício físico ou enquanto se está em pé durante longos períodos de tempo. Logo, o desenvolvimento de solas de sapatilhas, principalmente, de sapatilhas desportivas, com a absorção de energia (AE) requerida enquanto se realiza uma determinada atividade, pode contribuir não só para um maior conforto, mas também para uma diminuição do risco de lesões nas articulações. O principal componente da sola responsável por contribuir para uma boa AE é a entressola. Normalmente, a sua produção é feita a partir do fabrico subtrativo (FS), no entanto, nestes últimos anos, tem-se verificado o aumento do recurso às diversas tecnologias oferecidas pelo fabrico aditivo (FA).

Como a aplicação do FA para a produção de entressolas é uma área em ascensão, existe ainda muito espaço para melhorar, inovar e otimizar. Deste modo, para atingir o objetivo desta dissertação, pretende-se desenvolver, por FA, uma entressola, para uma sapatilha desportiva, com uma estrutura de treliça (ET) interna. Esta irá permitir alcançar um bom nível de conforto associado a uma AE de impacto eficiente, ao considerar aspetos de relevância como a distribuição de pressões na sola do pé do utilizador.

O desenvolvimento desta dissertação começou com a aquisição de forma da sola de uma sapatilha desportiva convencional, através das tecnologias de varrimento por laser e de luz estruturada. Desta forma, foi possível recolher a informação necessária para a geração do modelo digital da entressola compacta, sendo que este modelo foi o utilizado para a modelação da entressola com a ET interna.

De seguida, estudou-se, no âmbito da AE do impacto, duas ET auxéticas (ET 3D *re-entrant* e ET 2D *re-entrant*), caracterizadas por apresentarem uma AE superior comparativamente com ET não auxéticas. Através de diversas análises numéricas, concluiu-se que, tendo em conta as pressões máximas verificadas enquanto se está a correr, a ET 2D *re-entrant* revelou um melhor desempenho em comparação com a ET 3D *re-entrant*, sendo, por isso, a ET selecionada para este caso de estudo.

Deste modo, após dividir a sola do pé em seis regiões, variou-se a espessura da ET selecionada e estabeleceu-se a espessura adequada de acordo com a pressão máxima a que cada região está sujeita, de modo a que a entressola apresentasse um amortecimento idêntico nas diversas regiões, durante as diferentes fases da corrida.

Após a modelação da entressola na sua totalidade com a ET interna, imprimiu-se uma porção da entressola, através do processo *Fused Filament Fabrication* (FFF) e com o recurso ao

material escolhido, o TPU 95A (material com boas propriedades de flexibilidade, resistência e elasticidade), onde se verificou que a partir de ambos é possível obter uma entressola com uma boa fiabilidade em termos do fabrico dos pequenos detalhes da ET e com uma boa AE do impacto.

Keywords

Additive manufacturing; Lattice structures; Energy absorption;
Sport shoe sole; Midsole

Abstract

Footwear plays a key role in the daily routine of both high-level athletes and common citizens, during physical exercise or while standing for long periods of time. Therefore, the development of shoe soles, mainly sport shoes, with the energy absorption (AE) required while doing a certain activity, can contribute not only to greater comfort, but also to decrease the risk of joint injuries. The main component of the sole responsible for contributing to good AE is the midsole. Normally, its production is made using subtractive manufacturing (FS), however, in recent years, there has been an increase in the use of the various technologies offered by additive manufacturing (FA).

The application of FA to the production of midsoles is a growing area, where there is still the opportunity to improve, innovate and optimize. Thus, to accomplish the objective of this dissertation, a midsole for a sport shoe with an internal lattice structure (ET) will be developed by FA. This will allow to achieve a good level of comfort associated with an efficient AE of impact when considering relevant aspects, such as the pressure distribution on the user's foot.

The development of this dissertation began with the acquisition of the shape of the sole of a conventional sport shoe, using laser scanning and structured light technologies. Therefore, it was possible to collect the necessary information to generate the digital model of the compact midsole. This model allowed the production of the midsole with the internal ET.

Thus, in this dissertation, two auxetic lattice structures (3D re-entrant ET and 2D re-entrant ET), characterized by showing a superior AE compared to non-auxetic ET, were studied, considering the AE of impact. After various numerical analysis, it was concluded that, taking into account the maximum pressures observed while running, the 2D re-entrant ET revealed better performance compared to the 3D re-entrant ET. Therefore, the 2D re-entrant ET was the selected ET for this case study.

In this way, after splitting the sole of the foot into six regions, the thickness of the ET selected along the midsole was tested and the appropriate thickness was established according to the maximum pressure applied in each region, in order to have a midsole with similar cushioning throughout the regions, during the different running phases.

After modelling the midsole in its entirety with the internal ET, a portion of the midsole was printed, using the Fused Filament Fabrication (FFF) process and using TPU 95A (material with good properties of flexibility, resistance and elasticity) as the chosen material, where it was concluded that it is possible to obtain a midsole with good reliability in terms of manufacturing the small details of the ET and with a good AE of impact.⁵

Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Enquadramento..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 1 |
| 1.3 | Estrutura | 1 |
| 2 | Estado da arte | 3 |
| 2.1 | Fabrico aditivo | 3 |
| 2.1.1 | Tecnologias e processos | 3 |
| 2.1.2 | Vantagens e desvantagens | 4 |
| 2.2 | Design para fabrico aditivo | 5 |
| 2.3 | Estruturas de treliça..... | 5 |
| 2.3.1 | Definição e classificação..... | 5 |
| 2.3.2 | Aplicações | 8 |
| 2.3.3 | Estruturas para absorção de energia do impacto | 10 |
| 2.4 | Calçado desportivo..... | 12 |
| 2.4.1 | Estrutura e características..... | 12 |
| 2.4.2 | Distribuição de pressões no pé humano | 14 |
| 2.4.3 | Processos de fabrico e materiais utilizados | 18 |
| 2.4.4 | Introdução do fabrico aditivo na indústria do calçado | 19 |
| 3 | Metodologia | 21 |
| 3.1 | Levantamento de forma e geração do modelo 3D da entressola..... | 21 |
| 3.2 | Estudo de estruturas de treliça a integrar na entressola..... | 23 |
| 3.2.1 | Modelação e Dimensionamento das estruturas | 23 |
| 3.2.2 | Materiais..... | 24 |
| 3.2.3 | Simulação por MEF das estruturas..... | 25 |
| 3.2.4 | Seleção da estrutura a integrar na entressola..... | 29 |
| 3.2.5 | Análise da ET 2D <i>re-entrant</i> de acordo com a distribuição de pressões no pé..... | 32 |
| 3.3 | Aplicação da ET 2D <i>re-entrant</i> na entressola | 35 |
| 3.4 | Obtenção do modelo físico da entressola final..... | 36 |
| 4 | Análise de resultados e discussão..... | 40 |
| 5 | Conclusão..... | 41 |
| 6 | Trabalhos futuros..... | 42 |
| 7 | Referências | 43 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema representativo do processo FFF. Adaptado de [3]. | 4 |
| Figura 2. Classificação geral dos sólidos celulares. Adaptado de [8]. | 6 |
| Figura 3. Classificação das estruturas de treliça (ET) [13]. | 7 |
| Figura 4. Placa fria para um conversor de alta tensão da Puntosero [14]. | 8 |
| Figura 5. Implantes para a coluna da NanoHive Medical [15]. | 8 |
| Figura 6. Selim customizado, de acordo com os requisitos de cada utilizador, da Posedla [16]. | 9 |
| Figura 7. Estrutura de treliça do permutador de calor da GE [17]. | 9 |
| Figura 8. Sapatilha 4DFWD da Adidas Athletic Footwear [18]. | 10 |
| Figura 9. Curva de tensão-deformação típica para uma ET sob uma carga de compressão. Adaptado de [13]. | 11 |
| Figura 10. (A) ET 2D re-entrant; (B) ET 3D re-entrant (vista isométrica); (C) ET 3D re-entrant (vista frontal) [23]. | 12 |
| Figura 11. Ilustração representativa da localização dos componentes mais relevantes de uma sapatilha desportiva. Adaptado de [26]. | 13 |
| Figura 12. Ilustração representativa da diferença de altura entre o calcanhar e os dedos numa sapatilha desportiva. Adaptado de [33]. | 14 |
| Figura 13. Vista dorsal dos ossos do pé [34]. | 15 |
| Figura 14. (A) Sapatilha desportiva Futurecraft 4D; (B) Entressola da sapatilha desportiva Futurecraft 4D [45]. | 19 |
| Figura 15. Gráfico do crescimento expectável das receitas obtidas com a venda de calçado obtido por FA. Retirado de [44]. | 20 |
| Figura 16. (A) Sapatilha desportiva escolhida, com uma sola exterior em TPR e uma entressola em Phylon (espuma de EVA aquecida e comprimida); (B) Sola preparada para aquisição de forma. .. | 21 |
| Figura 17. Malha final obtida através do software Meshmixer. | 22 |
| Figura 18. Malha final obtida através do software Solidworks. | 22 |
| Figura 19. Modelo digital da entressola compacta. | 23 |
| Figura 20. Entressola modelada com dimensões de espessura. | 23 |
| Figura 21. ET 3D re-entrant, onde t indica a espessura - (A) Desenho com as dimensões seleccionadas finais (unidades em milímetros); (B) Vista isométrica. | 24 |
| Figura 22. ET 2D re-entrant, onde t indica a espessura - (A) Desenho com as dimensões seleccionadas finais (unidades em milímetros); (B) Vista isométrica. | 24 |
| Figura 23. Diagrama representativo dos tipos de suporte aplicados para todas as análises numéricas – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant. | 26 |
| Figura 24. Malha aplicada (setas a vermelho a indicar as zonas com uma malha mais fina) – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant. | 26 |
| Figura 25. Curvas de tensão-deformação da estrutura 3D re-entrant – (A) espessura de 1,4 mm; (B) espessura de 1,7 mm; (C) espessura de 2,0 mm. | 27 |
| Figura 26. Curvas de tensão-deformação da estrutura 2D re-entrant – (A) espessura de 1,4 mm; (B) espessura de 1,7 mm; (C) espessura de 2,0 mm. | 28 |
| Figura 27. (A) Gráfico da EA de cada ET em função da espessura (t); (B) Gráfico da EEA de cada ET em função da espessura (t). | 30 |
| Figura 28. Deslocamento na direção y – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant. | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 29. (A) Tensões na ET com filete de 0,4 mm; (B) Tensões na ET com filete de 0,6 mm; (C) Deslocamento na direção y na ET com filete de 0,4 mm; (D) Deslocamento na direção y na ET com filete de 0,6 mm (círculos a vermelho para facilitar a referência da região em específico)..... | 32 |
| Figura 30. Divisão da sola em seis regiões (onde o significado de cada sigla é o seguinte: PCL - Posterior central e lateral, PM - Posterior medial, M – Média, AL - Anterior lateral, AC - Anterior central, AM - Anterior medial). | 35 |
| Figura 31. Modelo digital da entressola final – (A) Vista lateral; (B) Vista de cima; (C) Vista isométrica. | 36 |
| Figura 32. Amostra da ET 2D re-entrant – (A) Preparação através do software Ultimaker Cura; (B) Impressão a partir do processo FFF. | 37 |
| Figura 33. (A) Entressola com porção a imprimir destacada a vermelho; (B) Vista isométrica da porção da entressola a imprimir. | 38 |
| Figura 34. Porção da entressola preparada para impressão..... | 38 |
| Figura 35. Porção do modelo físico da entressola final – (A) Vista lateral; (B) Vista de cima; (C) Vista isométrica..... | 39 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está em pé e parado. Adaptado de [35]. | 16 |
| Tabela 2. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está a caminhar. Adaptado de [36, 37, 38]. | 17 |
| Tabela 3. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está a correr. Adaptado de [38, 39, 40, 41]. | 18 |
| Tabela 4. Vantagens e desvantagens da introdução do FA na indústria do calçado. Adaptado de [44]. | 20 |
| Tabela 5. Propriedades mecânicas do TPU 85A e TPU 95A. | 25 |
| Tabela 6. Dados relacionados com a AE de cada ET. | 29 |
| Tabela 7. Atribuição da espessura da ET de acordo com a distribuição de pressões na sola do pé. | 33 |
| Tabela 8. Dados relacionados com a AE para cada região da entressola. | 34 |
| Tabela 9. Definições estabelecidas para a impressão do modelo físico da entressola. | 37 |

Lista de Abreviações

| | |
|-------------|--|
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| AE | Absorção de energia / <i>Energy absorption</i> |
| BJT | <i>Binder Jetting</i> / Jato de aglutinante |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> |
| DED | <i>Directed Energy Deposition</i> / Deposição direta de energia |
| DfM | <i>Design for manufacturing</i> / Design para fabrico |
| DfAM | <i>Design for additive manufacturing</i> / Design para fabrico aditivo |
| DLP | <i>Digital Light Processing</i> |
| DLS | <i>Digital Light Synthesis</i> |
| EA | Energia absorvida |
| EE | Estruturas estocásticas |
| EEA | Energia específica absorvida |
| ET | Estruturas de treliça / <i>Lattice structures</i> |
| EVA | <i>Ethylene-vinyl acetate</i> |
| FA | Fabrico Aditivo / <i>Additive manufacturing</i> |
| FDM | <i>Fused Deposition Modeling</i> |
| FFF | <i>Fused Filament Fabrication</i> |
| FS | Fabrico Subtrativo / <i>Subtractive manufacturing</i> |
| MEF | Método dos elementos finitos |
| MEX | Material <i>Extrusion</i> / Extrusão de material |
| MJT | <i>Material Jetting</i> / Jato de material |
| PBF | <i>Powder Bed Fusion</i> / Fusão em cama de pó |
| PU | Poliuretano |
| SC | Sólidos celulares |
| SHL | <i>Sheet Lamination</i> / Construção por Laminados |
| SLA | <i>Stereolithography</i> |
| SLS | <i>Selective Laser Sintering</i> |
| TPU | Termoplástico de poliuretano / <i>Thermoplastic polyurethane</i> |
| VPP | <i>Vat Photopolymerization</i> / Fotopolimerização de resina |

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O fabrico aditivo (FA) surgiu na década de 1980 com o intuito de automatizar a criação de protótipos. No entanto, na última década tem crescido a sua aplicação no desenvolvimento de produtos finais. Esta capacidade de fabrico tem sido aplicada nas mais diversas áreas de desenvolvimento de produtos como alternativa ao fabrico subtrativo (FS), trazendo consigo várias vantagens, como por exemplo, a redução do peso da peça, a simplificação do processo de fabrico e o aumento da *performance* do produto final.

Com a ascensão do FA em termos de processos e materiais a utilizar, tem aumentado as possibilidades de fabrico de peças com geometrias complexas, tais como estruturas de treliça (ET), permitindo, assim, variar a sua rigidez e a sua estrutura interna. Deste modo, as tecnologias de FA com materiais poliméricos podem apresentar uma mais-valia no fabrico de peças com função de absorção de energia (AE), nomeadamente energia aquando do impacto, como é o caso das solas de sapatilha.

Hoje em dia, a personalização tem sido considerada bastante importante numa grande variedade de produtos, incluindo o calçado. Assim, com o FA aliado à indústria do calçado é possível fabricar solas customizadas e adaptadas aos requerimentos e às pressões exercidas pelo pé de cada utilizador.

O calçado tem um papel fulcral no dia-a-dia tanto de atletas de alta competição como do cidadão comum, durante a prática de exercício físico ou enquanto se está em pé durante longos períodos de tempo. Logo, o recurso ao FA para o desenvolvimento de solas de sapatilha com uma boa AE, pode contribuir não só a um maior conforto, mas também a uma diminuição do risco de lesões nas articulações.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa estudar a possibilidade da utilização do FA num produto, de modo a melhorar o conforto e bem-estar do utilizador. Assim, o objeto de estudo será o desenvolvimento de uma sola, mais precisamente, uma entressola, de uma sapatilha desportiva capaz de absorver energia enquanto se realizam atividades físicas de alto desempenho, como a corrida.

Para atingir este objetivo serão desenvolvidas e estudadas várias ET, de modo a selecionar aquela que apresenta uma melhor resposta em termos de AE. Consequente, a estrutura selecionada será integrada na entressola tendo em conta as pressões exercidas aquando do contacto do pé com o solo durante a corrida.

Por fim, parte da entressola final será produzida a partir do processo *Fused Filament Fabrication* (FFF), como representação real da ET escolhida de modo a materializar as conclusões aferidas na presente dissertação, bem com a evidenciar que esta cumpre a finalidade proposta a nível da AE de impacto.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, sendo que, a seguir, apresenta-se uma breve descrição sobre os tópicos abordados em cada um dos capítulos.

O capítulo 1 aborda o enquadramento, objetivos e organização estrutural da presente dissertação.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, o qual serve de enquadramento teórico dos vários temas de interesse para o caso de estudo. Com base na revisão bibliográfica, vários conceitos são descritos e analisados, desde o fabrico aditivo e estruturas de treliça até a diversas informações importantes em relação ao calçado desportivo.

O Capítulo 3 aborda a metodologia, na qual se descreve todo o processo de desenvolvimento, desde a aquisição de forma da sola selecionada, até à obtenção por fabrico aditivo da entressola com estruturas de treliça, com a função principal de absorção de energia, integradas no seu interior.

O Capítulo 4 apresenta a análise de resultados e discussão, onde se discute os resultados finais obtidos após a impressão do modelo.

No Capítulo 5 apresenta-se algumas conclusões a reter com o desenvolvimento desta dissertação.

O Capítulo 6 é acerca dos diversos trabalhos futuros associados não só a pequenas melhorias a fazer dentro deste caso de estudo, mas também alternativas ao mesmo.

No capítulo 7 encontra-se as referências a que se recorreu ao longo desta dissertação.

2 Estado da arte

2.1 Fabrico aditivo

O fabrico aditivo (FA) encontra-se definido na ISO/ASTM 52900:2021 e é um termo atribuído aos diversos processos de união de material, que permitem criar modelos ou peças, normalmente, por deposição de camadas sucessivas, ao contrário do fabrico subtrativo (FS) [1]. Na maioria dos processos aditivos, cada camada depositada é semelhante a uma secção bidimensional, com uma espessura na ordem da décima de milímetro, e liga-se à camada anterior, dando, assim, forma à peça final [2]. Para além disso, com este tipo de fabrico é possível obter um modelo físico diretamente a partir de um modelo digital projetado em *Computer Aided Design* (CAD) [2].

O FA também é referido como “impressão tridimensional”; no entanto, segundo a ISO/ASTM 52900:2021, este termo é, principalmente, utilizado quando se refere a máquinas de uso não industrial ou doméstico. Por isso, o uso do termo “impressão tridimensional” está, normalmente, associado a um contexto não técnico [1].

Os primeiros processos aditivos surgiram na década de 1980 [3] com o intuito de automatizar a criação de protótipos, sendo, desta forma, originalmente referidos como processos de prototipagem rápida. A introdução destes processos na indústria ajudou não só a melhorar os produtos finais, como também a reduzir o seu tempo de desenvolvimento. Por isso, com o aumento da necessidade de colocação de novos produtos no mercado no menor tempo possível, algumas empresas apostaram no desenvolvimento desta área de fabrico. Por conseguinte, os constates avanços no FA levaram a que novos processos fossem criados e ao aumento da variedade de materiais disponíveis, contribuindo, assim, para a sua expansão a nível do fabrico de moldes, ferramentas e peças finais [2].

2.1.1 Tecnologias e processos

Atualmente, existem várias tecnologias aditivas, as quais se podem dividir nas seguintes 7 categorias [1]:

- Jato de aglutinante / *Binder Jetting* (BJT)
- Deposição direta de energia / *Directed Energy Deposition* (DED)
- Extrusão de material / *Material Extrusion* (MEX)
- Jato de material / *Material Jetting* (MJT)
- Fusão em cama de pó / *Powder Bed Fusion* (PBF)
- Construção por Laminados / *Sheet Lamination* (SHL)
- Fotopolimerização de resina / *Vat Photopolymerization* (VPP)

Cada uma das tecnologias mencionadas anteriormente tem as suas vantagens e limitações, de tal modo que a sua escolha para o fabrico de uma determinada peça depende de vários fatores para obter o resultado pretendido, tais como, o tipo de material, a velocidade e custo de fabrico, a precisão dimensional, o tamanho da construção, o nível de suavidade/rugosidade da superfície, entre outros [2].

Posto isto, os avanços observados na área do FA conduziram a que um dos processos aditivos mais usados fosse o *Fused Filament Fabrication* (FFF) ou *Fused Deposition Modeling* (FDM), que, apesar de não apresentar o nível de fiabilidade de reprodução de detalhes finos e de precisão

comparativamente com outros processos aditivos, é processo limpo (e, por isso, adequado ao uso em espaço de escritório), fácil de utilizar e relativamente barato [2, 3].

O processo FFF utiliza a tecnologia MEX e recorre a uma cabeça extrusora pré-aquecida, através da qual passa um filamento contínuo, normalmente termoplástico [1]. Por conseguinte, o filamento aquecido é depositado sobre a plataforma de impressão, produzindo uma camada muito fina. O processo repete-se e é depositada uma nova camada sobre a camada anterior já solidificada [3, 4]. Na **Figura 1** está ilustrado um esquema representativo do processo FFF.

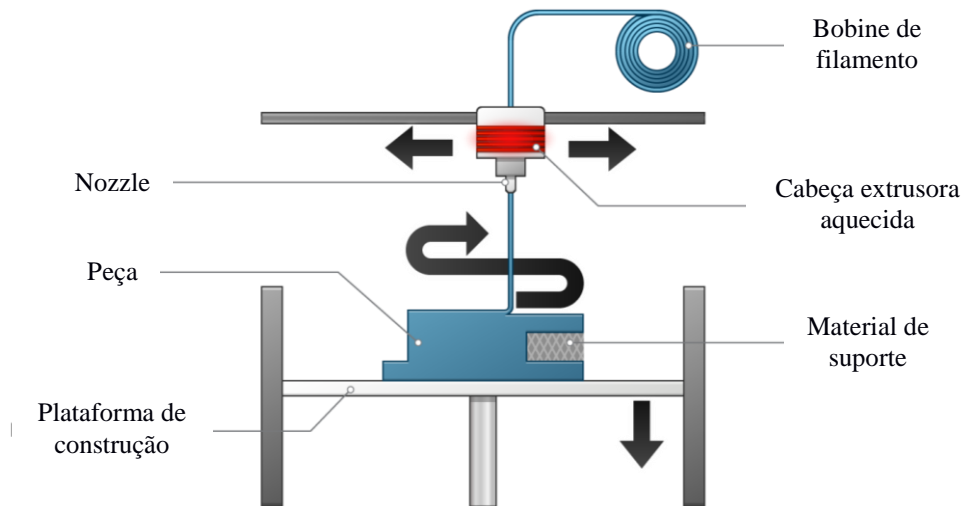


Figura 1. Esquema representativo do processo FFF. Adaptado de [3].

2.1.2 Vantagens e desvantagens

Apesar do constante desenvolvimento na área do FA, o FS continua a afirmar-se como o tipo de fabrico mais utilizado, principalmente, devido ao reduzido custo e tempo de fabrico na produção em massa em comparação com o FA [2]. Contudo, o rápido crescimento do FA revelou trazer diversas vantagens em relação aos processos subtrativos, das quais se destacam as seguintes [2]:

- Processo de fabrico automático, de baixa vigilância e de elevada segurança;
- Produção de pouco ruído e resíduos, o que facilita as condições de instalação;
- Obtenção de peças mais leves e otimizadas, uma vez que adiciona-se material apenas onde é necessário;
- Produção de peças com geometrias complexas (a complexidade geométrica de uma peça é independente da seu processo de construção), como por exemplo, estruturas de treliça (ET) e canais ou partes encapsuladas no interior;
- Obtenção de peças com geometrias profundas com aresta e com contra-saída (saída negativa);
- Consolidação de várias peças numa peça única;
- Inexistência de gabaris, moldes ou outros dispositivos de fixação;
- Redução dos prazos de entrega para as peças únicas, originais ou a produção em pequenos lotes (ou seja, uma produção com um volume de *output* baixo).

Todavia, ainda existem algumas desvantagens associadas ao FA, tais como [2]:

- Velocidade de construção muito lenta, na maioria dos processos;
- Limites para o tamanho da peça, geralmente, inferiores a 300x300x300 mm (no entanto, já existem algumas exceções);
- Pouca diversidade de materiais disponíveis em comparação à disponível no FS;
- Superfície final da peça, normalmente, necessita de um nível acabamento ou revestimento superior em comparação com o FS.

Por fim, apesar de no futuro ser possível ultrapassar algumas das limitações referidas anteriormente, o FA já se tem revelado como uma alternativa mais económica relativamente ao FS na produção de certas peças. Isto justifica-se pelo facto de ser possível o fabrico de peças de grande complexidade geométrica, eliminando, simultaneamente, a utilização de ferramentas ou moldes e de processos de montagem. Por isto, o uso de processos aditivos pode ser mais viável no fabrico de peças personalizadas ou individualizadas conforme os requisitos específicos do cliente [2].

2.2 Design para fabrico aditivo

Durante as últimas décadas, o desenvolvimento de novos produtos recorre ao Design para fabrico, em inglês *Design for manufacturing* (DfM), que consiste em projetar um produto, tendo em consideração o processo de fabrico que será utilizado, a minimização do custo e a simplificação do fabrico, mas sem reduzir a qualidade e desempenho do produto final [5, 6].

Inicialmente, o DfM foi criado com a intenção de otimizar o desenvolvimento de produtos quando se recorre aos processos convencionais. No entanto, com a utilização de processos aditivos, algumas das restrições, tais como a necessidade de ferramentas e a dificuldade de fabrico de estruturas de elevada complexidade, encontradas nos processos convencionais são eliminadas [2, 6].

Assim, de modo a responder às novas possibilidades de fabrico disponíveis no FA, surge o Design para fabrico aditivo, em inglês *Design for additive manufacturing* (DfAM), com o objetivo de usufruir das vantagens do FA referidas anteriormente, como por exemplo, o desenvolvimento de produtos mais complexos e leves. Para além disso, através do DfAM, pretende-se projetar um produto de acordo com processo de fabrico escolhido e no sentido de otimizar, principalmente, a funcionalidade e desempenho do produto final [6].

2.3 Estruturas de treliça

2.3.1 Definição e classificação

Um dos grandes benefícios que o DfAM oferece é a possibilidade de desenvolver peças com geometrias complexas, como é o caso dos sólidos celulares (SC) [7]. Os SC são estruturas celulares artificiais, inspiradas nas estruturas celulares e cristalinas observadas na natureza (ossos, troncos e folhas de árvores, cortiça, favos de mel, microestruturas de alguns metais, etc.) [8], e correspondem a uma rede de células conectadas entre si através de arestas ou faces sólidas, de modo a preencher um certo espaço [7].

Para além disso, estas estruturas têm vindo a ganhar popularidade nos últimos anos em diversas áreas devido a apresentarem algumas características relevantes em comparação com as peças sólidas, tais como [8, 9]:

- Elevado rácio na relação entre a resistência mecânica e o peso;
- Flexibilidade de *design* (isto é, a capacidade de modificar e otimizar as propriedades de uma peça através da alteração da geometria da estrutura);
- Redução do desperdício de material;
- Diminuição do volume estrutural (ou seja, a adição de material apenas onde é necessário para que o produto final desempenhe a funcionalidade requerida).

Apesar do FA ter ganho relevância em relação ao fabrico de peças com estruturas celulares, continua-se a utilizar os processos convencionais, como a maquinagem CNC, a fundição ou a conformação por deformação, para o fabrico destas estruturas, especialmente quando estas são de grandes dimensões [9, 10]. Um exemplo é a estrutura celular de alumínio que se encontra no interior dos painéis sandwich usada no revestimento de aeronaves [10]. No entanto, os processos convencionais apresentam algumas desvantagens, como o facto de serem processos lentos, terem a necessidade de um pós-processamento complicado para a ligação das estruturas, levarem ao desperdício de material e apresentarem limitações em termos das geometrias de estruturas possíveis de construir [9,11].

Por isso, desde a introdução do FA, a sua aplicação na produção de estruturas celulares em diversas áreas permitiu não só uma maior flexibilidade no desenvolvimento de estruturas mais complexas e diversificadas na sua forma e tamanho, mas também a redução do desperdício de material e custo de fabrico [9, 10].

Em termos da distribuição das células, os SC podem classificar-se em estruturas estocásticas (EE) e estruturas de treliça (ET). A **Figura 2** apresenta esta classificação.

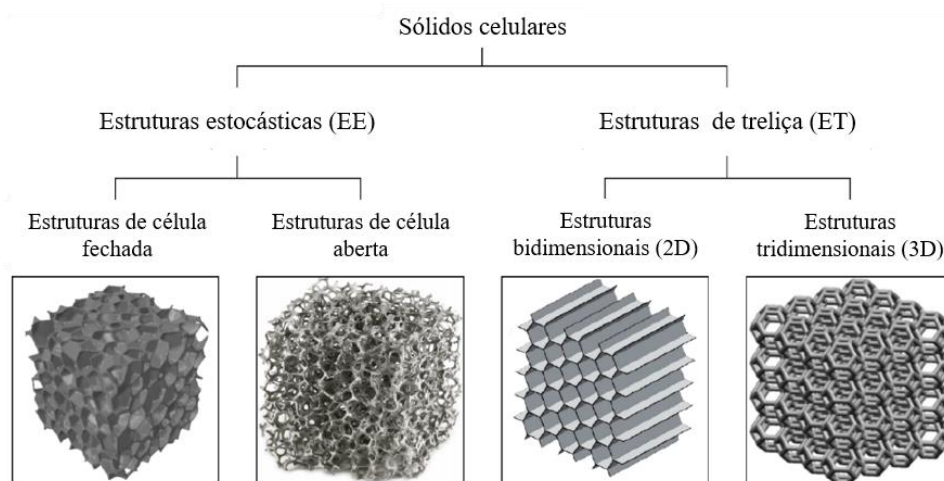


Figura 2. Classificação geral dos sólidos celulares. Adaptado de [8].

As EE são estruturas cuja distribuição de células é gerada aleatoriamente, isto é, as células apresentam formas e tamanhos diferentes [9]. Estas estruturas podem ser analisadas e otimizadas com o auxílio de uma ferramenta estatística, no entanto, não é possível serem construídas ou previstas com precisão, o que, por sua vez, se reflete num certo grau de incerteza em relação ao seu comportamento final [12]. Para além disso, as estruturas estocásticas podem ser divididas em estruturas de célula aberta (a estrutura permite a passagem de fluídos ou gases) e de célula fechada (a estrutura é não porosa e impermeável) [8, 11]. Por vezes, estas estruturas também são referidas como espumas.

Relativamente às ET, a sua definição difere de acordo com a fonte bibliográfica, no entanto, estas podem ser definidas como estruturas porosas que apresentam apenas uma célula unitária que se repete ou células de topologias diferentes conectas e organizadas segundo um padrão específico, de modo a preencher um certo volume [8, 9].

Posto isto, é possível distinguir as ET de acordo com a uniformidade da distribuição das células. Ou seja, existem ET uniformes, isto é, estruturas formadas pela repetição de uma célula unitária onde a sua topologia e tamanho são constantes ao longo do volume da estrutura; e as ET não uniformes, isto é, estruturas onde as células apresentam uma topologia ou tamanho diferente ao longo do volume da estrutura [9].

Adicionalmente, estas estruturas podem ser divididas em estruturas bidimensionais (2D) e estruturas tridimensionais (3D), tal como se verifica na **Figura 3**. As estruturas 2D subdividem-se em estruturas gerais, auxéticas (estruturas com um coeficiente de *Poisson* negativo) e hierárquicas. Por outro lado, as estruturas 3D subdividem-se em estruturas de *truss-based*, *plate-based*, *shell-based* e hierárquicas [13].

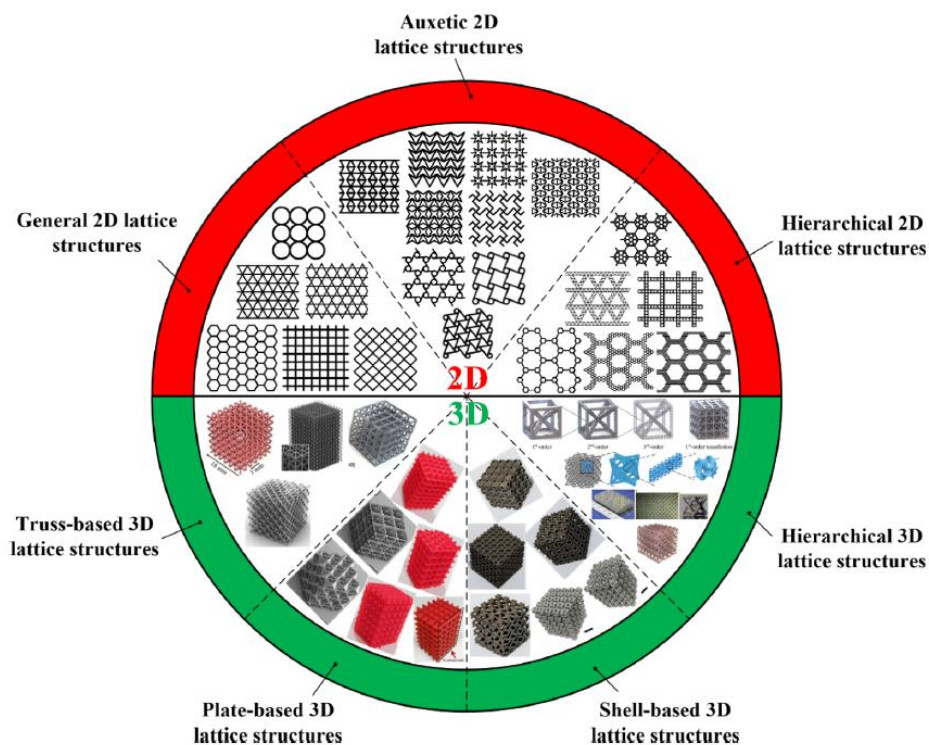


Figura 3. Classificação das estruturas de treliça (ET) [13].

Além disso, as ET são estruturas com excelentes propriedades (mecânicas, térmicas, acústicas, etc.) que podem melhorar o desempenho e funcionalidade do produto final. As propriedades mais relevantes que as ET oferecem são [9, 10]:

- Redução do peso
- Alta resistência mecânica e rigidez
- Boa absorção de energia do impacto (devido à sua capacidade de sofrer grandes deformações quando dispostas a níveis de tensão relativamente baixos)
- Dissipação de calor (devido à grande área de superfície)
- Isolamento acústico (devido ao elevado número de poros internos)

Por conseguinte, é possível controlar e ajustar com elevada precisão as propriedades das ET através da alteração da topologia e geometria (tamanho e espessura) das células, de acordo com os requisitos da área de interesse (automóvel, aeroespacial, desportiva, engenharia biomédica, engenharia mecânica, entre outras) onde se pretende aplicar [8, 9].

Em suma, em comparação com as EE, a utilização de ET permite, geralmente, o fabrico de produtos com um desempenho mais eficiente e otimizado devido às suas propriedades comutativas [9].

2.3.2 Aplicações

Atualmente, devido às excelentes propriedades das ET e ao *design* flexível oferecido pelo FA, a implementação destas estruturas tem aumentado com o objetivo de melhorar a *performance* dos produtos finais. De seguida, apresentam-se alguns exemplos da aplicação das ET em diversas áreas [11].

Na área automóvel, a agência Puntozero projetou uma placa fria para um conversor de alta tensão, na qual se utilizou uma estrutura de *shell-based* (**Figura 4**). Como resultado obteve-se uma placa 25% mais leve e com uma área de superfície 300% superior em relação ao *design* anterior [14].

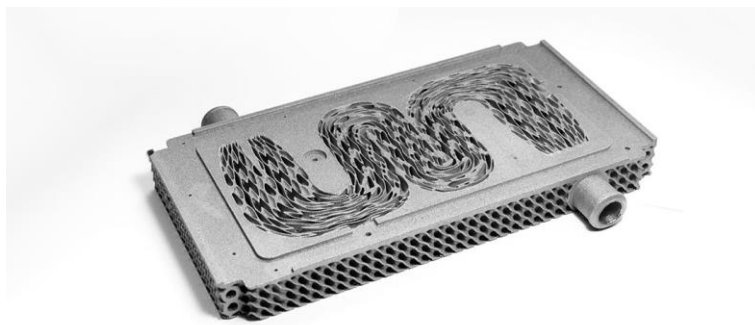


Figura 4. Placa fria para um conversor de alta tensão da Puntozero [14].

A nível da engenharia biomédica, a empresa NanoHive Medical (especializada no *design* de implantes para a coluna usados durante cirurgias para tratar doenças degenerativas) utilizou uma ET para reduzir a rigidez do implante de titânio (**Figura 5**), permitindo, assim, a distribuição das tensões pela coluna e, conseqüentemente, a redução da atrofia óssea junto do implante [15].



Figura 5. Implantes para a coluna da NanoHive Medical [15].

Na área do desporto, tem-se verificado a aposta no fabrico de selins de bicicleta constituídos por ET não uniformes que têm por base a aplicação de células de diferentes topologias e tamanhos em diferentes zonas do objeto. O selim obtido através deste processo de fabrico apresenta não só uma maior durabilidade, mas também fornece ventilação e caracteriza-se por ser de fácil manutenção no que se refere à sua limpeza. Atualmente são produzidos selins customizados de acordo com os requisitos de cada utilizador, tal como é o exemplo da empresa Posedla (**Figura 6**) [16].



Figura 6. Selim customizado, de acordo com os requisitos de cada utilizador, da Posedla [16].

Na área da engenharia mecânica/térmica, o recurso ao FA tem possibilitado a obtenção de ET com geometrias muito complexas, como é o caso do fabrico de permutadores de calor de menores dimensões e mais eficientes. O permutador de calor, projetado pela GE (**Figura 7**) com o objetivo de otimizar o fluxo de dióxido de carbono a 900°C, é um ótimo exemplo das excelentes propriedades das ET (como é o caso das grandes dimensões da área de superfície de contacto) que podem ser alcançadas quando se recorre ao FA [17].



Figura 7. Estrutura de treliça do permutador de calor da GE [17].

Por fim, na área do calçado, a Adidas Athletic Footwear, em colaboração com a Carbon 3D, lançou a sapatilha 4DFWD (**Figura 8**) em 2021 (série de calçado desportivo com uma entressola obtida através do processo *Digital Light Synthesis* (DLS)). A entressola apresenta uma ET que tem como base uma célula personalizada, a célula FWD, a qual foi projetada com objetivo de absorver a energia do impacto e impulsionar para a frente os utilizadores em movimento [18].



Figura 8. Sapatilha 4DFWD da Adidas Athletic Footwear [18].

2.3.3 Estruturas para absorção de energia do impacto

Nos últimos anos, o crescimento da popularidade e implementação das ET em diversas áreas tem contribuído para o aumento do número de estudos relacionados com as suas excelentes propriedades, sendo que uma das mais relevantes é a absorção de energia (AE). A AE de uma ET refere-se ao processo de dissipação de energia quando esta é sujeita a uma carga externa. Deste modo, a grande maioria destes estudos tem como foco a análise e compreensão das características de diversas ET quando sujeitas a diferentes tipos de cargas, tais como, a compressão, a tração, a flexão, a torção, entre outros [13].

Relativamente ao estudo da absorção de energia em diversas ET, os principais métodos de análise são analíticos, numéricos (simulações através do método dos elementos finitos (MEF)) e experimentais [13].

Por sua vez, estes métodos de análise podem ter por base os princípios de um teste quasi-estático, o qual afirma-se como uma representação simplificada de uma situação real e complexa que está, por isso, associado a velocidades mais reduzidas (normalmente, na ordem dos mm/min).

Por outro lado, estes podem ser classificados como testes dinâmicos, os quais permitem o estudo do comportamento das ET a velocidades mais elevadas (usualmente, na ordem dos mm/s ou m/s) e em função do tempo, ou seja, considerando os efeitos da inércia, do amortecimento e das cargas que variam no tempo [13, 19].

Em relação ao estudo da AE da compressão, recorre-se, geralmente, a testes quasi-estáticos, a partir dos quais é possível obter a curva de tensão-deformação. Esta curva pode ser dividida em três diferentes regiões: elástica, plástica e de densificação (**Figura 9**) [13].

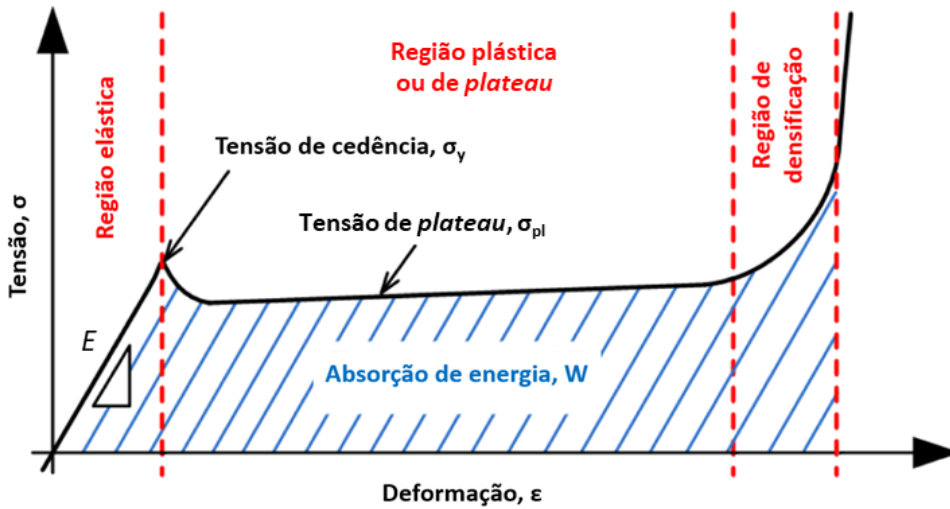


Figura 9. Curva de tensão-deformação típica para uma ET sob uma carga de compressão. Adaptado de [13].

Tal como se pode verificar na **Figura 9**, a AE de uma ET ocorre, principalmente, na região plástica, através de uma deformação plástica e irrecuperável [13].

No entanto, para o caso AE do impacto, recorre-se, geralmente, a testes dinâmicos, os quais se traduzem numa curva de tensão-deformação com uma tensão de *plateau* mais elevada e, por sua vez, com uma energia específica absorvida (EEA) superior, em comparação com as obtidas em testes quasi-estáticos [20, 21].

Em relação à energia absorvida (EA) por unidade de volume, W_v (Jm^{-3}), esta é definida pela área sob a curva de tensão-deformação, de acordo com a equação [2.1], onde $\sigma(\epsilon)$ é a tensão de fluxo da ET, ϵ_i é a deformação inicial e ϵ_f é a deformação final.

$$W_v = \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_f} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad [2.1]$$

A EEA por unidade de massa, W_m (Jkg^{-1}) é obtida fazendo a correção da W_v à densidade da ET, a qual é representada pelo produto entre a densidade relativa (ρ'), calculada a partir da razão entre o volume ocupado pela ET e volume ocupado por um corpo sólido com as mesmas dimensões totais da ET, e a densidade do material utilizado (ρ_M), segundo a equação [2.2].

$$W_m = \frac{W_v}{\rho' \cdot \rho_M} \quad [2.2]$$

Apesar de atualmente existir uma grande variedade de ET com diferentes características que potenciam uma boa AE, as ET auxéticas destacam-se por apresentarem um coeficiente de *Poisson* negativo, isto é, quando sujeitas a uma carga de compressão longitudinal, estas contraem transversalmente e quando sujeitas a uma carga de tração longitudinal, estas expandem transversalmente [19].

As ET auxéticas apresentam uma EEA alta, uma vez que apresentam uma região de *plateau* considerável, onde é dissipada uma elevada quantidade da energia do impacto. Além disso, no caso do impacto de um objeto a uma velocidade significativa, estas estruturas apresentam uma alta resistência contra a penetração, devido ao aumento da sua densidade na zona do impacto [21].

Por fim, as ET auxéticas também apresentam uma elevada resistência contra forças de corte e uma reduzida probabilidade de ocorrência de fraturas. Consequentemente e com base em vários estudos, pode-se ainda afirmar que as ET auxéticas apresentam uma AE do impacto superior em comparação com as estruturas não-auxéticas [22].

No que diz respeito à classificação das ET auxéticas, existem diversos tipos não só em 2D, mas também em 3D que, geralmente, podem ser divididas em estruturas *re-entrant*, *chiral*, *rotating unit* e *perforated sheets* [19, 22].

Em relação às ET auxéticas *re-entrant*, existem duas ET de elevado interesse em termos da AE, que se destacam pela sua simplicidade de fabrico e flexibilidade de aplicação em diversas áreas. Estas duas ET são a 2D *re-entrant* e a 3D *re-entrant* (**Figura 10**) [21, 23].

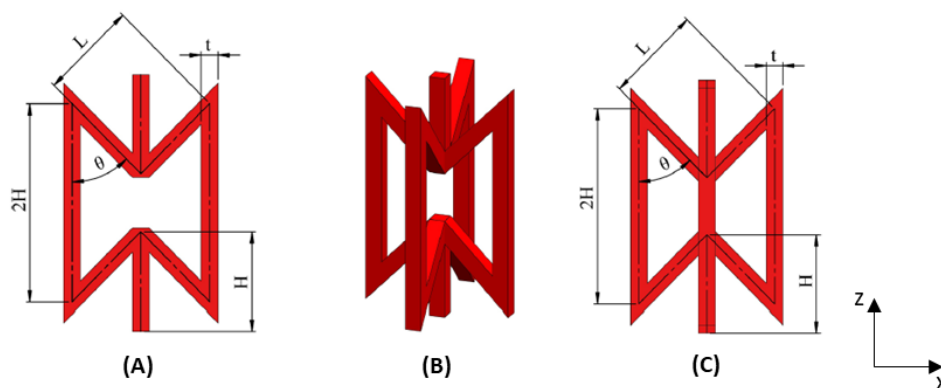


Figura 10. (A) ET 2D *re-entrant*; (B) ET 3D *re-entrant* (vista isométrica); (C) ET 3D *re-entrant* (vista frontal) [23].

Em ambas as ET, a EEA atinge valores mais elevados quando sujeita a uma carga na direção *z* em relação à direção *x*, comportamento este que fica otimizado quando a dimensão *H* é igual à *L*. Deste modo, é importante realçar que apesar das duas ET não apresentarem um comportamento auxético na direção *z*, esta é a direção onde se observa uma melhor AE. No entanto, a ET 2D *re-entrant* apresenta uma EEA superior em comparação com a ET 3D *re-entrant* quando exposta a uma deformação superior a 15% [21, 23].

2.4 Calçado desportivo

2.4.1 Estrutura e características

O calçado desempenha um papel fulcral no nosso quotidiano, visto que apresenta funções e características essenciais, tais como, proteção, conforto, suporte, estabilidade, flexibilidade, amortecimento e absorção de energia do impacto, podendo, deste modo, prevenir lesões nas articulações ou tendões, corrigir a postura e aumentar a performance desportiva [24].

Qualquer tipo de calçado, que inclui desde sapatos casuais e botas até sapatilhas desportivas e ortopédicas, é constituído, principalmente, por dois componentes: a parte superior (componente

que envolve o pé do utilizador, assegurando o seu posicionamento correto e protegendo-o de detritos exteriores) e a sola [25, 26].

Todavia, a sola é, efetivamente, o principal componente responsável por assegurar as funções referidas anteriormente. De uma forma geral, a sola divide-se em três camadas distintas [25, 26]:

- palmilha, que garante conforto ao moldar-se à morfologia do pé do utilizador;
- entressola ou sola intermédia (normalmente, associada a calçado desportivo ou ortopédico), que é responsável pelo amortecimento, absorção de energia ao impacto, suporte e estabilidade;
- sola exterior, que fornece aderência, durabilidade e resistência.

Na **Figura 11** encontra-se ilustrado a localização dos componentes mais relevantes de uma sapatilha desportiva.

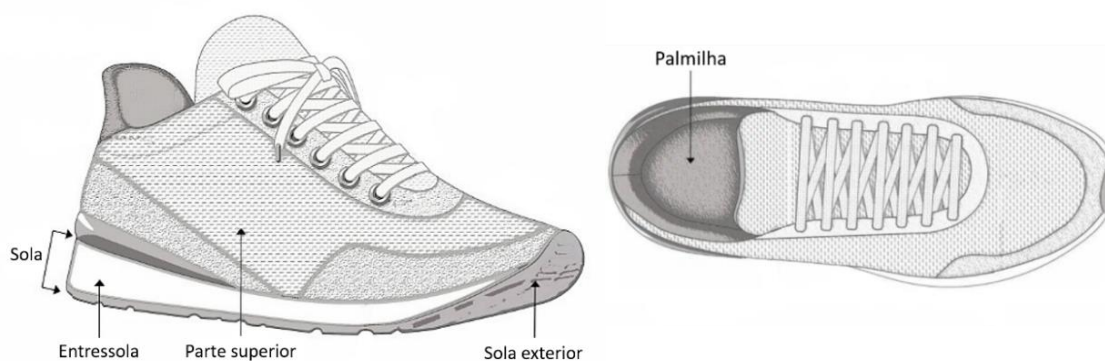


Figura 11. Ilustração representativa da localização dos componentes mais relevantes de uma sapatilha desportiva. Adaptado de [26].

Em relação ao calçado desportivo, que será o foco da presente dissertação, tem-se verificado nestes últimos anos uma grande evolução, na qual se destaca o desenvolvimento de sapatilhas com diversas características, desde um *design* minimalista até um *design* maximalista [27].

Por um lado, uma sapatilha de *design* minimalista tenta simular, a nível biomecânico, o movimento natural do pé, sendo que para tal tem em conta os seguintes critérios: sola bastante flexível, peso inferior a 200 gramas, espessura da sola na zona do calcanhar inferior a 20 milímetros e diferença de altura entre o calcanhar e os dedos inferior a 7 milímetros [28]. Por outro lado, caso os limites destes critérios sejam ultrapassados, a sapatilha é classificada como tendo um *design* convencional ou até mesmo maximalista (sapatilha com um design semelhante ao convencional, mas com uma entressola que possui um amortecimento superior) [29].

Deste modo, de uma forma simples e geral, é importante mencionar que a variação de algumas propriedades das solas, como é o caso da flexibilidade, do peso, da espessura e da diferença de altura entre o calcanhar e os dedos do pé do utilizador, pode influenciar o conforto, o desempenho desportivo e o risco de lesões do utilizador, tendo em conta as suas preferências e características biomecânicas [27, 29].

Por exemplo, a utilização de um calçado com uma entressola mais macia pode reduzir as forças de impacto e as taxas de carregamento nas articulações; enquanto que uma entressola demasiado rígida pode conduzir a uma postura incorreta do sujeito e, conseqüente, aparecimento de lesões, nomeadamente durante a realização de atividades físicas [30].

Outro caso é as sapatilhas com entressolas de espessura elevada que podem proporcionar melhores efeitos de amortecimento e absorção de energia durante os impactos; no entanto, levam a uma diminuição da sensibilidade do pé do sujeito e, por conseguinte, a uma maior instabilidade [30].

Em relação à diferença de altura entre o calcanhar e os dedos (**Figura 12**), esta pode variar desde um valor negativo (onde o calcanhar está abaixo do nível dos dedos), a um valor nulo até a um valor positivo (onde o calcanhar está acima do nível dos dedos), podendo este chegar a valores superiores a 20 milímetros [28]. A utilização de sapatilhas com diferentes valores deste fator influencia a maneira como o pé entra em contacto com o solo durante a realização de qualquer atividade de carácter físico, o que, por sua vez, afeta diferentes partes do corpo humano, isto é [31, 32]:

- para uma diferença de altura reduzida é exercida uma pressão superior sobre os tornozelos e os tendões de Aquiles, sendo que as zonas de contacto com o solo são a zona média e posterior do pé;
- para uma diferença de altura superior é exercida uma pressão superior sobre os joelhos e a anca, sendo que a zona de contacto com o solo é a zona anterior do pé.

Deste modo, a grande maioria das sapatilhas desportivas apresenta uma diferença de altura entre calcanhar e os dedos de 10 milímetros, uma vez que, assim, consegue-se obter não só um calçado confortável, mas também versátil, ao ponto de abranger a maioria da população, permitindo ainda a realização de várias atividades de componente física [32].



Figura 12. Ilustração representativa da diferença de altura entre o calcanhar e os dedos numa sapatilha desportiva. Adaptado de [33].

Por fim, a escolha do calçado mais indicado para cada utilizador não deve ser efetuada com base numa só propriedade, mas sim segundo a conjugação equilibrada das várias propriedades que estão subjacentes à construção de uma sapatilha desportiva.

2.4.2 Distribuição de pressões no pé humano

Para que o fabrico de calçado atinga as funções e características referidas no capítulo 2.4.1, um dos pontos mais relevantes a considerar é ter conhecimento de como as pressões se distribuem sob o pé humano.

Deste modo, em relação à distribuição de pressões exercidas pelo pé humano, verifica-se que existem muitas variáveis que influenciam a sua medição, tais como, o peso, a idade, o sexo ou até mesmo a morfologia do pé. Outro fator que pode contribuir para resultados completamente distintos está relacionado com o facto de o utilizador estar em pé e parado ou, por outro lado, estar a desempenhar uma atividade física: quer seja a caminhada, a corrida ou qualquer outra atividade ou desporto.

Durante o estudo da distribuição de pressões no pé, este, normalmente, é dividido em pelo menos em três regiões [34]:

- região anterior, que inclui o calcâneo e o astrágalo (talus);
- região média, que inclui o cuboide, o escafoide (navicular) e os cuneiformes;
- região posterior, que inclui os metatársicos e as falanges (dedos).

Consequentemente, estas regiões podem ser subdivididas nas regiões lateral (lado externo do pé), medial (lado interno do pé) e, por vezes, central ou até mesmo em outras regiões mais específicas, consoante a orientação pretendida com o estudo.

A **Figura 13** apresenta a vista dorsal dos ossos do pé, para um melhor entendimento da localização das diversas regiões referidas anteriormente.

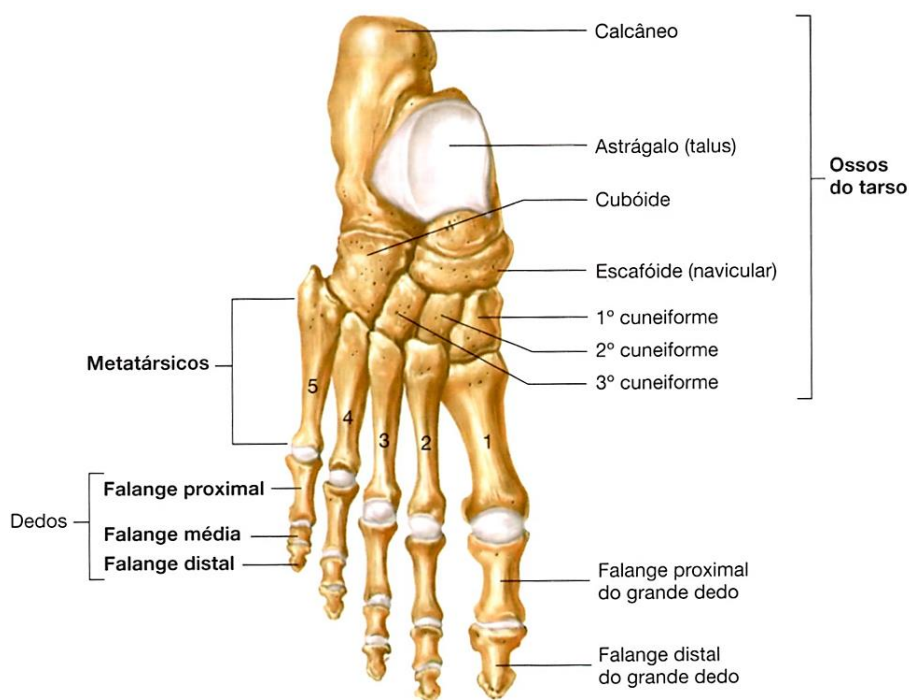


Figura 13. Vista dorsal dos ossos do pé [34].

De seguida, apresenta-se a distribuição de pressões observada na sola do pé enquanto se está em pé, a caminhar e, por fim, a correr, de forma a realizar um estudo completo sobre a influência da realização de atividades de carácter físico (especialmente, aeróbico) tem na variação das pressões. É de realçar que os resultados apresentados abaixo são referentes a estudos com indivíduos sem patologias associadas aos seus pés e ao tipo de marcha.

No caso da distribuição de pressões enquanto se está em pé e descalço, Cavanagh *et al.* (1987) [35] efetuou um estudo com uma população de 107 indivíduos (66 do sexo masculino e 41 do sexo feminino), na qual a idade média é $30,1 \pm 9,9$ anos, o peso médio é $71,4 \pm 14,9$ kg e a altura média é $1,74 \pm 0,1$ m. Neste estudo analisou-se a distribuição de pressões, através da seleção aleatória de um dos pés, enquanto cada indivíduo se mantém em pé numa posição confortável, estável e equilibrada em termos das pressões exercidas em ambos os pés. A **Tabela 1** sumariza a distribuição de pressões enquanto se está em pé e parado.

Tabela 1. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está em pé e parado. Adaptado de [35].

| Região | | Pressão [kPa] | |
|-----------------|-------------------|--------------------------|------|
| Anterior | Medial | 138,9 | |
| | Lateral | 132,6 | |
| Média | Medial | 19,2 | |
| | Lateral | 27,8 | |
| Posterior | Medial | 1º Metatársico | 38,4 |
| | | Dedo grande | 20,4 |
| | Central e Lateral | 2º Metatársico | 51,8 |
| | | 3º, 4º e 5º Metatársicos | 53,4 |
| | | 2º Dedo | 8,7 |
| Dedos restantes | 16,1 | | |

Em relação à distribuição de pressões enquanto se caminha, apresentam-se, seguidamente, três artigos de estudo.

Bisiaux *et al.* (2008) [36] realizou um estudo com uma população de 11 indivíduos do sexo masculino, onde a idade média é $23,9 \pm 5,3$ anos, o peso médio é $78,6 \pm 5,8$ kg e a altura média é $1,81 \pm 0,06$ m. Neste estudo analisou-se a distribuição de pressões, através do sistema de palmilhas *Parotec*, enquanto cada indivíduo caminha com um andamento confortável em três situações distintas: antes, imediatamente após e 30 minutos depois da realização de uma corrida. Na **Tabela 2** apresenta-se as médias das pressões medidas nestas três situações.

Ava Segal *et al.* (2004) [37] estudou uma população de 20 sujeitos (11 homens e 9 mulheres), na qual a idade média é $39,5 \pm 11,5$ anos, o peso médio é $73,1 \pm 10,8$ kg e a altura média é $1,74 \pm 0,1$ m. O objetivo deste estudo foi medir a distribuição de pressões, através do sistema de palmilhas *Pedar-X*, enquanto se caminha numa passadeira de corrida a diferentes velocidades, desde 0,75 m/s até 2,0 m/s. Na **Tabela 2** apresenta-se os valores medidos à velocidade de 1,5 m/s, uma vez que a velocidade média de caminhar encontra-se entre 1,25 e 1,5 m/s.

Por fim, Chuckpaiwong *et al.* (2008) [38] efetuou um estudo com uma população de 50 indivíduos, com patologias associadas aos pés (34 indivíduos com pés normais e 16 indivíduos com pés planos), através do sistema de palmilhas *Pedar-X*. Esta população caracteriza-se por ter uma idade média de $25,0 \pm 3,8$ anos, um peso médio de $78,2 \pm 15,4$ kg e uma altura média de $1,77 \pm 0,09$ m. Este estudo permitiu medir a distribuição de pressões enquanto se percorre uma distância de 10 m a uma velocidade de 1,8 m/s a caminhar. Na **Tabela 2** apresentam-se os valores das pressões medidas, realçando ainda que a diferença entre os resultados obtidos para os indivíduos com pés normais vs. indivíduos com pés planos não é significativa, exceto na região do 4º e 5º metatársicos.

Tabela 2. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está a caminhar. Adaptado de [36, 37, 38].

| Região | | Pressão [kPa] | | | |
|-----------|-------------------|----------------------|-------------|-------------|-------|
| | | Artigo [36] | Artigo [37] | Artigo [38] | |
| Anterior | Medial | 143,7 | 260,3 | 207,3 | |
| | Lateral | 134,0 | | | |
| Média | Medial | 1,7 | - | 109,7 | |
| | Lateral | 26,0 | - | 123,4 | |
| Posterior | Medial | 1º Metatársico | 153,7 | 196,2 | 202,6 |
| | | Dedo grande | 119,3 | 286,8 | 242,9 |
| | Central e Lateral | 2º e 3º Metatársicos | 203,0 | 211,5 | 201,2 |
| | | 4º e 5º Metatársicos | 129,7 | 159,0 | 175,4 |
| | | Dedos restantes | - | - | 187,9 |

Em relação à distribuição de pressões durante a corrida, apresentam-se, de seguida, os três artigos abaixo e uma breve descrição dos mesmos.

Tessutti *et al.* (2012) [39] realizou um estudo com uma população de 47 pessoas, sendo 34 do sexo masculino (a idade média é 35,1 anos, o peso médio é $73,5 \pm 10,6$ kg e a altura média é $1,78 \pm 0,06$ m) e 13 do sexo feminino (a idade média é 38,9 anos, o peso médio é $53,2 \pm 4,0$ kg e a altura média é $1,59 \pm 0,05$ m). Neste estudo analisou-se a distribuição de pressões, através do sistema de palmilhas *Pedar-X*, durante uma corrida de 40 m a uma velocidade de corrida de 3,33 m/s e em quatro diferentes tipos de piso (asfalto, cimento, relva natural e borracha). Na **Tabela 3** apresenta-se as médias das pressões medidas nestes quatro pisos distintos [38].

Ho *et al.* (2012) [40] estudou uma população de 20 indivíduos do sexo feminino, onde a idade média é $20,7 \pm 4,7$ anos, o peso médio é $53,3 \pm 6,8$ kg e a altura média é $1,60 \pm 0,07$ m. O objetivo deste estudo foi medir a distribuição de pressões, através do sistema de palmilhas *Pedar-X*, enquanto se corre numa passadeira de corrida a diferentes velocidades, desde 1,5 m/s até 2,5 m/s, considerando ainda diferentes inclinações, desde 0° até 15°. Na **Tabela 3** apresenta-se os valores medidos à velocidade de 2,5 m/s e à inclinação de 0° [39].

Eils *et al.* (2004) [41] realizou um estudo com uma população de 21 sujeitos, na qual a idade média é $25,5 \pm 1,8$ anos, o peso médio é $78,7 \pm 5,4$ kg e a altura média é $1,83 \pm 0,06$ m. Neste estudo analisou-se a distribuição de pressões, através do sistema de palmilhas *Pedar-X*, durante uma corrida de 150 m a uma velocidade de corrida de 4,2 m/s e com sapatilhas de futebol. Na **Tabela 3** apresenta-se os valores das pressões registados durante a corrida [38].

Por fim, Chuckpaiwong *et al.* (2008) [38] efetuou ainda um estudo com uma população de 50 indivíduos, com patologias associadas aos pés (34 indivíduos com pés normais e 16 indivíduos com pés planos), através do sistema de palmilhas *Pedar-X*. Esta população caracterizou-se por ter uma idade média de $25,0 \pm 3,8$ anos, um peso médio de $78,2 \pm 15,4$ kg e uma altura média de $1,77 \pm 0,09$ m. Este estudo permitiu medir a distribuição de pressões enquanto se percorre uma distância de 10 m a uma velocidade de 3,3 m/s a correr. Na **Tabela 3** apresentam-se os valores das pressões medidas enquanto os indivíduos correm.

Tabela 3. Distribuição de pressões na sola do pé enquanto se está a correr. Adaptado de [38, 39, 40, 41].

| Região | | Pressão [kPa] | | | | |
|-----------|-------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | | Artigo [39] | Artigo [40] | Artigo [41] | Artigo [38] | |
| Anterior | Medial | 298,8 | 191,3 | 298 | 259,8 | |
| | Central | 333,1 | | - | | |
| | Lateral | 324,1 | | 294 | | |
| Média | Medial | 114,8 | 178,2 | 140 | 159,8 | |
| | Lateral | | 162,3 | 191 | 181,9 | |
| Posterior | Medial | 1º Metatársico | 354,2 | 377,8 | 414 | 304,6 |
| | | Dedo grande | | 333,1 | 348 | 303,4 |
| | Central e Lateral | 2º e 3º Metatársicos | 266,5 | 266,5 | 336 | 295,4 |
| | | 4º e 5º Metatársicos | | 203,9 | 293 | 246,2 |
| | | 2º Dedo | | 147,8 | 187 | 260,0 |
| | | Dedos restantes | | | 199 | |

Em suma, pode-se verificar que para além dos fatores mencionados anteriormente, o sistema de medição das pressões, a zona de contacto com o solo no momento de impacto, o tipo e propriedades da sapatilha que se está a utilizar e a velocidade de realização da atividade, neste caso, a caminhada e a corrida, também influenciam, drasticamente, a distribuição de pressões. No entanto, de um modo geral, com base nos artigos apresentados anteriormente, observa-se que as pressões em todas as regiões da sola do pé aumentam consecutivamente desde que o indivíduo está em pé, até ao momento em que este inicia a marcha com uma caminhada até à corrida, sendo as regiões anterior e posterior medial que apresentam os valores mais elevados de pressão exercida pelo pé no solo.

2.4.3 Processos de fabrico e materiais utilizados

O fabrico de calçado, não só nos processos utilizados, mas também nos materiais, tem evoluído bastante nestes últimos anos com o avanço tecnológico.

Atualmente, praticamente todas as sapatilhas desportivas são fabricadas por processos convencionais e são assembleadas através do processo de construção por *cold cement*, ao invés do processo de construção por vulcanização, o que permite a utilização de uma maior variedade de materiais, uma vez que o processo de construção por vulcanização pressupõe que os materiais utilizados suportem elevadas temperaturas [42].

Em relação à parte superior do calçado desportivo, normalmente, são cortados os seus diversos componentes, utilizando uma forma de corte, a partir de um rolo de malha respirável de poliéster ou *nylon* [42].

No que diz respeito à sola do calçado desportivo, a entressola é de espuma de EVA (*Ethylene-vinyl acetate*), PU (poliuretano) ou TPU (termoplástico de poliuretano) e a sola exterior é, geralmente, de borracha, mas também pode ser de espuma de EVA ou PU de alta densidade. Alguns dos processos utilizados são, por exemplo, a moldação por compressão e a prensagem a frio [42, 43].

Ao longo dos anos, verificaram-se ainda várias modificações associadas ao fabrico convencional, no sentido de melhorar a absorção de energia aquando do impacto, especialmente na entressola, tais como, a adição de camadas de materiais com diferentes densidades (através do recurso a componentes em gel) e a colocação de pequenas câmaras-de-ar sob a zona do calcanhar [43].

Todavia, apesar dos processos convencionais serem bastante importantes para a indústria do calçado atualmente, algumas empresas têm apostado no estudo e produção de vários componentes do calçado a partir de FA.

2.4.4 Introdução do fabrico aditivo na indústria do calçado

A primeira aplicação do FA na indústria do calçado teve como objetivo a criação de protótipos, visando, desta forma, a análise e o teste dos produtos antes de se obter o produto final. Contudo, recentemente, com a evolução do FA não só em termos de tecnologias e materiais disponíveis, mas também através da redução do custo de produção em massa, a utilização deste tipo de fabrico tem-se tornado cada vez mais viável e com um potencial emergente no futuro da indústria do calçado [44].

De tal modo que já se tem verificado algumas aplicações revolucionárias com recurso ao FA, como é o caso das entressolas que foram os primeiros produtos de consumo a serem produzidos em massa e as palmilhas que foram os primeiros produtos a serem personalizáveis em massa, com base nos dados de cada utilizador [44].

Como exemplo, em 2017, a Adidas afirma-se como uma empresa pioneira ao lançar uma sapatilha desportiva, produzida em massa, com uma entressola obtida por FA, a Futurecraft 4D (**Figura 14**), tendo sido utilizado para tal o processo DLS [45]. Nestes últimos anos, a empresa alemã tem continuado a produzir diferentes modelos e tem-se verificado também a introdução neste tipo de fabrico de outras marcas de grande relevância, como a Reebok, a New Balance e a Columbia, com a produção do seu calçado impresso em 3D.

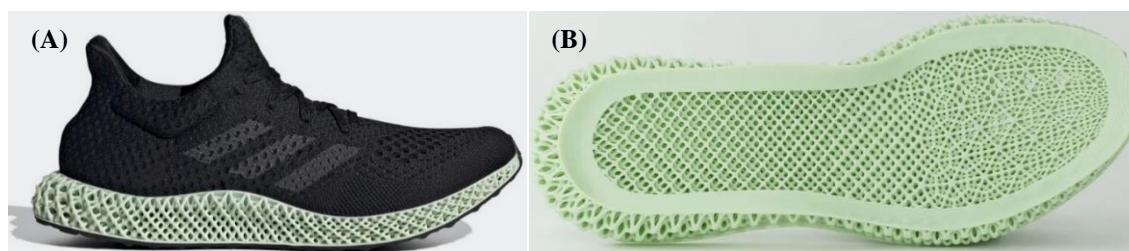


Figura 14. (A) Sapatilha desportiva Futurecraft 4D; (B) Entressola da sapatilha desportiva Futurecraft 4D [45].

Relativamente às tecnologias de FA utilizadas na indústria do calçado, a mais relevante é a fotopolimerização de resina (VPP), que inclui processos como o SLA (*Stereolithography*), o DLP (*Digital Light Processing*) e o DLS (*Digital Light Synthesis*). Outra tecnologia bastante relevante é a fusão em cama de pó (PBF), sendo usado os processos de SLS (*Selective Laser Sintering*) e PBF (*Powder Bed Fusion*). Uma tecnologia menos utilizada em termos industriais é a extrusão de material (MEX), com o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*) [44].

Em relação aos materiais mais utilizados na indústria do calçado, o mais comum é o PU, uma vez que é um material que revela boas propriedades de resistência, flexibilidade e elasticidade, para além de estar disponível numa grande variedade de estados (filamento, pó ou resina). Outro material com características semelhantes ao PU e também bastante usado em diversos processos é o TPU [36].

As principais vantagens e desvantagens que se observam com o uso do FA na indústria do calçado são as apresentadas na **Tabela 4** [44].

Tabela 4. Vantagens e desvantagens da introdução do FA na indústria do calçado. Adaptado de [44].

| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| Redução do tempo de chegada do produto ao mercado via prototipagem rápida | Elevado custo de instalação |
| Aumento da automação na produção | Elevado custo do material |
| Aumento das possibilidades de <i>design</i> de novos produtos | Difícil de mudar a cadeia de valor estabelecida atualmente |
| Maior conforto oferecido pela personalização do calçado, com a aquisição de dados geométricos e biométricos de cada utilizador | Elevado custo das formas para o fabrico de um calçado personalizado |
| Aumento da facilidade de acesso ao mercado de compra/venda de calçado por pedido | Baixo rácio de risco/benefício para justificar a sua aplicação imediata |

Por fim, em termos de receita gerada, em 2018, a indústria do calçado alcançou os 260 mil milhões de dólares, sendo o calçado obtido por FA responsável por 0,3% da receita total. Deste modo, apesar de existirem algumas desvantagens, é espectável que, até 2029, os produtos obtidos por FA alcancem 1,5% da receita total, o que corresponderá a cerca de 5,9 mil milhões de dólares (**Figura 15**) [44].

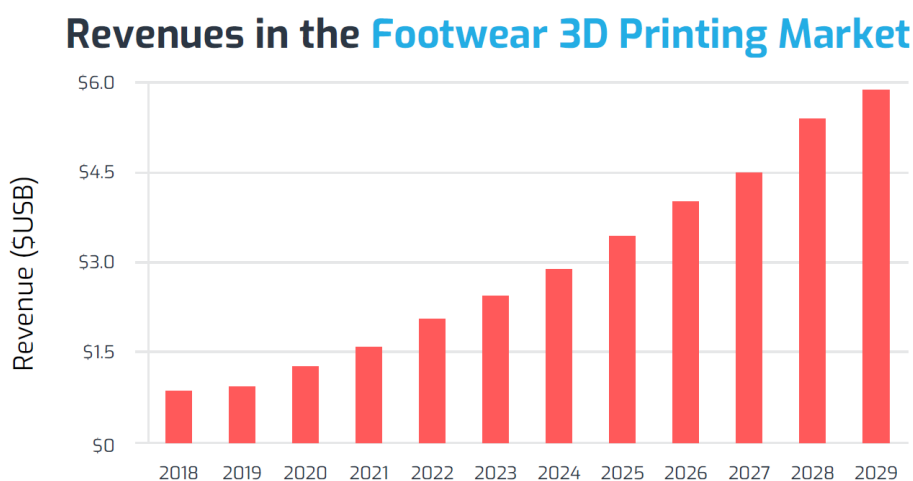


Figura 15. Gráfico do crescimento expectável das receitas obtidas com a venda de calçado obtido por FA. Retirado de [44].

3 Metodologia

Este capítulo detalha os passos necessários ao longo do processo de desenvolvimento de uma sola de sapatilha desportiva, através da utilização do FA para AE do impacto.

Deste modo, para realizar este projeto recorreu-se ao processo de engenharia inversa, que permite a criação de um modelo geométrico a partir do objeto físico e que, por sua vez, permite melhorar e inovar os modelos de produtos existentes [2]. O objeto físico, neste caso, é a sola de uma sapatilha desportiva, mais concretamente a entressola.

Posto isto, este processo de engenharia inversa da sola escolhida pode ser dividido em três etapas fundamentais:

- Levantamento de forma e geração do modelo 3D da entressola
- Estudo de estruturas de treliça a integrar na entressola
- Aplicação da ET 2D *re-entrant* na entressola
- Obtenção do modelo físico da entressola final

3.1 Levantamento de forma e geração do modelo 3D da entressola

Inicialmente, efetuou-se a escolha do objeto de estudo: a entressola de uma sapatilha desportiva (**Figura 16 (A)**). De seguida, procedeu-se à preparação da sola da sapatilha correspondente ao pé direito, para o levantamento da sua forma (**Figura 16 (B)**).



Figura 16. (A) Sapatilha desportiva escolhida, com uma sola exterior em TPR e uma entressola em Phylon (espuma de EVA aquecida e comprimida); (B) Sola preparada para aquisição de forma.

Posto isto, no que diz respeito à aquisição da forma da sola, recorreu-se a duas tecnologias: a tecnologia de varrimento por laser e a tecnologia de luz estruturada, sendo que ambas utilizam métodos sem contacto físico. A razão para a utilização de duas tecnologias diferentes foi na tentativa de obter o melhor resultado possível em termos de levantamento da forma, uma vez que existem algumas limitações que dificultam a obtenção de uma digitalização com uma boa qualidade, tais como, o componente a preto da sola exterior e as sombras.

A digitalização da sola foi possível através do aparelho Roland LPX-250, que recorre à tecnologia de varrimento por laser e do aparelho Thor3D Calibry, que utiliza a tecnologia de luz estruturada.

Dando as várias tentativas de digitalização da sola como concluídas através das duas tecnologias referidas, obteve-se os respetivos ficheiros, sendo estes de dois tipos, nuvem de pontos (ficheiro TXT) ou malha de triângulos (ficheiro STL).

Por conseguinte, a partir destes ficheiros selecionou-se dois ficheiros de malha de triângulos, visto que através dos dados presentes em ambos foi possível obter uma boa representação da superfície exterior da sola. O primeiro ficheiro apresentava a superfície superior e lateral da sola e foi obtido através da tecnologia de luz estruturada e o segundo apresentava a superfície inferior da sola e foi obtido através da tecnologia de apalpação por laser.

De seguida, procedeu-se ao tratamento das malhas de triângulos, sendo que para tal recorreu-se ao *software* Meshmixer. Neste *software* realizou-se a união das duas malhas de triângulos e também a sua limpeza, através da eliminação de algum ruído e irregularidades. A malha final obtida através do *software* Meshmixer é a apresentada na **Figura 17**.

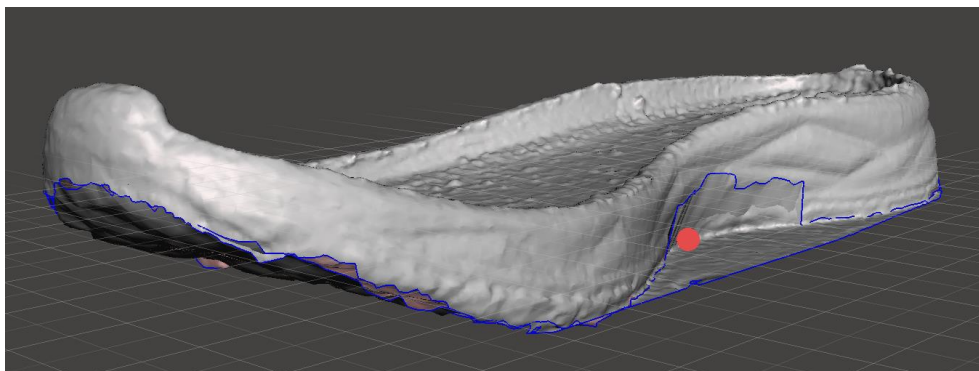


Figura 17. Malha final obtida através do software Meshmixer.

O próximo passo consistiu em importar a malha obtida no *software* Meshmixer para um *software* de CAD 3D (neste caso, o *software* Solidworks). No *software* Solidworks recorreu-se, primeiramente, ao *add-in* ScanTo3D para realizar a respetiva importação da malha e, de seguida, procedeu-se a uma limpeza mais minuciosa e ao refinamento da malha, através do preenchimento pequenas falhas e da aplicação de uma pequena suavização. A malha resultante deste processo é a apresentada na **Figura 18**.

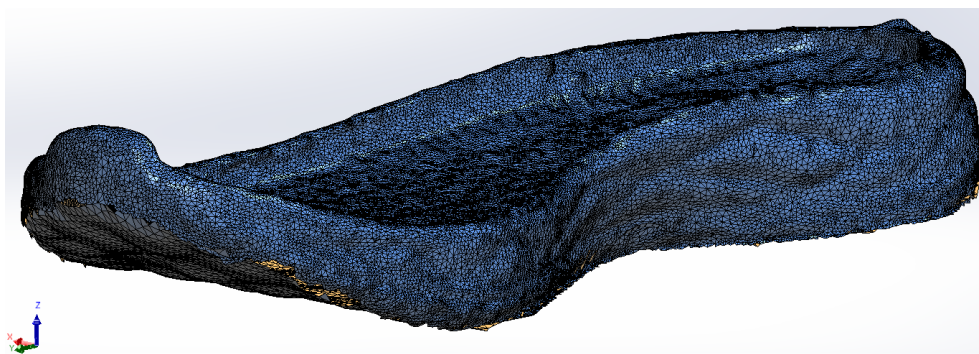


Figura 18. Malha final obtida através do software Solidworks.

Após a obtenção da malha final otimizada, executou-se a reconstrução de superfícies, sendo que para tal utilizou-se a técnica de geração de curvas de guia (correspondente à ferramenta *curve wizard* no *software* Solidworks).

Por fim, com o auxílio das curvas de guia, procedeu-se à modelação das superfícies da sola (através das ferramentas *Surface-fill*, *Surface-loft* e *Surface-extrude* no *software* Solidworks) e, finalmente, gerou-se o modelo sólido digital e representativo da sola física (através da ferramenta *Surface-knit* no *software* Solidworks). A **Figura 19** ilustra o modelo digital da entressola compacta.

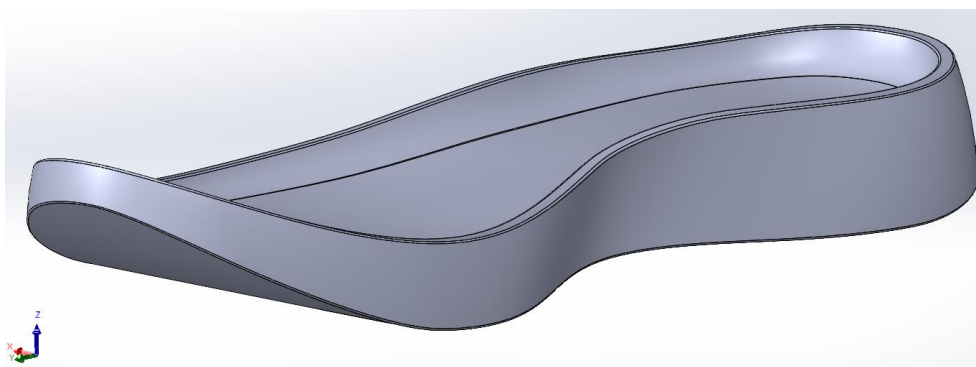


Figura 19. Modelo digital da entressola compacta.

3.2 Estudo de estruturas de treliça a integrar na entressola

Este capítulo descreve o processo de modelação e análise numérica de diferentes ET a integrar na entressola, de modo a obter uma boa AE do impacto aquando do contacto do pé com o solo. O desenvolvimento desta fase foi possível através do recurso ao *software* Solidworks.

Tendo em conta as vantagens das ET auxélicas apresentadas no capítulo 2.3.3, seleccionou-se as duas ET referidas pelo facto de estas se destacarem pela sua simplicidade e grande flexibilidade de alteração e otimização das suas propriedades para este caso de estudo. As propriedades que se podem modificar são: geometria (dimensões e ângulos), espessura e material utilizado.

3.2.1 Modelação e Dimensionamento das estruturas

O primeiro passo consistiu na modelação e no dimensionamento das duas ET seleccionadas, tendo em conta as dimensões da entressola apresentadas na **Figura 20** e os diversos pontos referidos no capítulo 2.3.3.

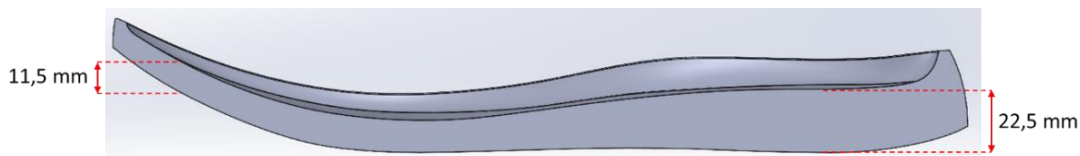


Figura 20. Entressola modelada com dimensões de espessura.

Deste modo, após algumas iterações foi possível modelar as duas ET, para as quais foi considerada uma altura máxima de 11 milímetros, de forma a que estas desempenhassem corretamente a sua função de AE.

A primeira ET selecionada foi a estrutura 3D *re-entrant*, que se encontra representada na **Figura 21** com as respetivas dimensões.

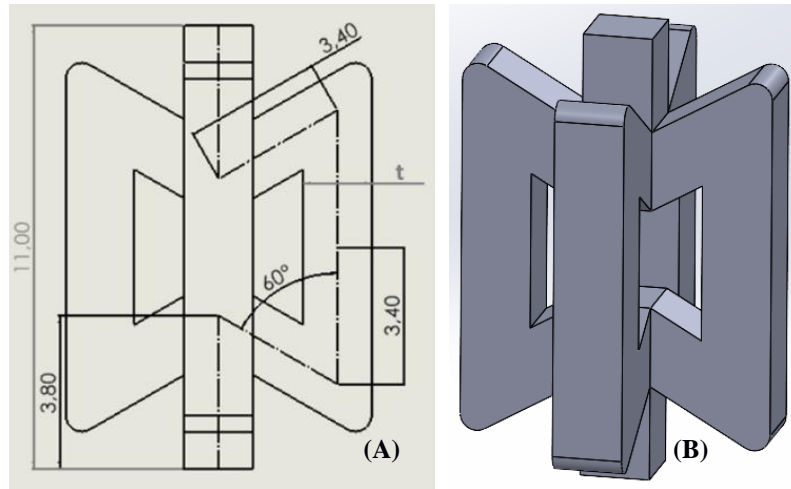


Figura 21. ET 3D *re-entrant*, onde t indica a espessura - (A) Desenho com as dimensões selecionadas finais (unidades em milímetros); (B) Vista isométrica.

A segunda ET escolhida foi a estrutura 2D *re-entrant*, cuja representação e respetivas dimensões constam na **Figura 22**. É de realçar ainda que o comprimento e largura totais desta ET são iguais, tal como na ET 3D *re-entrant*.

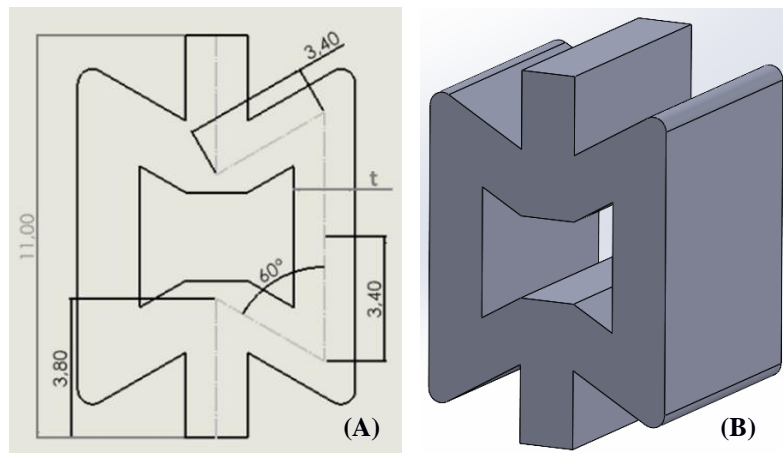


Figura 22. ET 2D *re-entrant*, onde t indica a espessura - (A) Desenho com as dimensões selecionadas finais (unidades em milímetros); (B) Vista isométrica.

Por fim, no que diz respeito ao valor associado à espessura (t), este valor foi considerado uma das variáveis ao longo desta dissertação, sendo referido os seus valores nos próximos capítulos.

3.2.2 Materiais

A seleção dos materiais para aplicação nas ET e conseqüente produção da entressola esteve restrita aos filamentos disponíveis para fabrico através do processo FFF.

Para além disso, tal como se referiu no capítulo 2.4.4, os materiais mais utilizados no FA de entressolas são o PU e o TPU, devido a serem extremamente flexíveis, resistentes e elásticos.

Desta forma, escolheu-se para este estudo, dois tipos de TPU de diferentes durezas: o TPU 85A e o TPU 95A.

O TPU 85A e o TPU 95A possuem características relativamente semelhantes, no entanto, o TPU 95A acaba por ser um pouco mais fácil de imprimir devido a apresentar uma dureza mais alta.

Na **Tabela 5** apresenta-se as propriedades mecânicas de ambos os tipos de TPU.

Tabela 5. Propriedades mecânicas do TPU 85A e TPU 95A.

| | TPU 85A | TPU 95A |
|--------------------------------|---------|---------|
| Densidade [kg/m ³] | 1120 | 1220 |
| Módulo de <i>Young</i> [MPa] | 12 | 26 |
| Tensão de cedência [MPa] | 4 | 8,6 |
| Tensão de rotura [MPa] | 26 | 39 |
| Deformação à cedência [%] | 65 | 55 |
| Deformação à rotura [%] | 660 | 580 |
| Coefficiente de <i>Poisson</i> | 0,36 | 0,40 |

3.2.3 Simulação por MEF das estruturas

Para permitir uma melhor compreensão e avaliação do comportamento das duas ET quando sujeitas a uma carga de compressão, efetuou-se vários testes onde se variou alguns parâmetros. Tal como foi mencionado no capítulo 2.3.3, para o presente caso de estudo os testes de compressão podem ser efetuados tendo por base dois tipos de testes distintos: os testes quasi-estáticos e os testes dinâmicos.

Os testes dinâmicos permitem recriar uma situação real da aplicação de uma carga de compressão, uma vez que consideram o facto da velocidade de compressão diminuir desde a velocidade de impacto inicial até atingir o estado de repouso, à medida que o objeto em estudo absorve energia.

Por outro lado, os testes quasi-estáticos são uma representação simplificada da realidade, o que se traduz em condições simplificadas de análise numérica, mas que também permitem aferir uma avaliação correta deste caso de estudo.

Deste modo, optou-se por realizar uma análise quasi-estática não-linear, de forma a ser possível aplicar uma carga de compressão e obter resultados ao longo das diversas iterações até se atingir a carga total aplicada.

Com este estudo é importante ainda realçar que as ET não se deformem plasticamente, isto é, que não ultrapassem a tensão de cedência dos materiais escolhidos, de modo a recuperarem o seu formato inicial.

Para realização das diversas análises, modelou-se dois corpos rígidos (corpos que não se deformam durante a realização de uma simulação), um diretamente acima da ET e outro diretamente abaixo, sendo aplicada, de seguida, uma união global nos três corpos (corpo rígido superior, ET e corpo rígido inferior). No corpo rígido inferior colocou-se uma condição de fronteira de encastre, de modo a que este não se desloca-se em qualquer direção, e no corpo rígido superior aplicou-se um deslocamento apenas na direção y de 1,7 milímetros (a escolha deste valor está associada ao facto das ET deformarem-se apenas elasticamente e de não entrarem em contacto com ambos os corpos rígidos numa zona em específico). A **Figura 23** demonstra um diagrama representativo das condições aplicadas para a realização das diversas simulações.

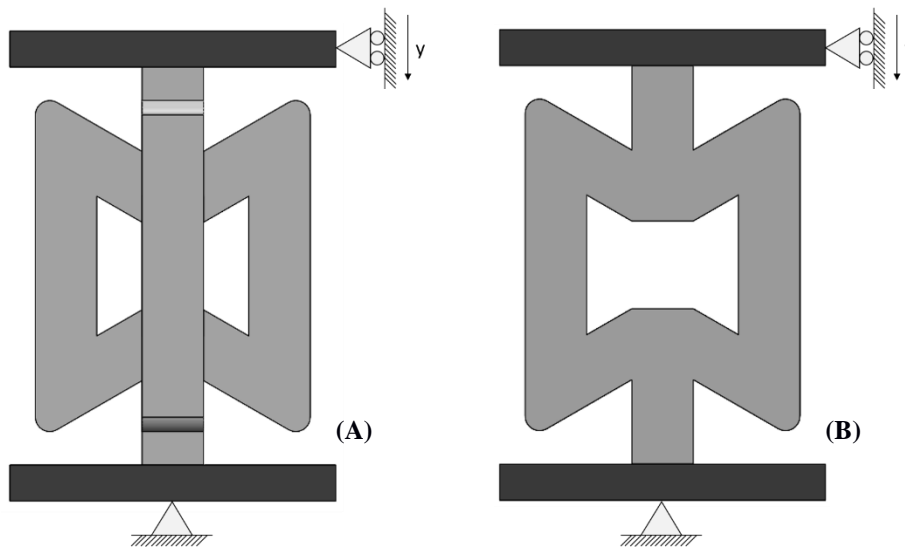


Figura 23. Diagrama representativo dos tipos de suporte aplicados para todas as análises numéricas – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant.

Em relação à geração da malha de elementos finitos, aplicou-se uma malha com elementos sólidos tetraédricos, em ambas as ET para a realização dos diversos testes, sendo que no que diz respeito à atribuição do número de elementos totais teve-se em consideração não só a precisão dos resultados, mas também o tempo despendido durante a simulação. Para além disso, aplicou-se uma malha um pouco mais fina nas zonas mais críticas de ambas as ET (indicadas com as setas a vermelho na **Figura 24**), de modo a atingir uma melhor precisão durante da aquisição de resultados.

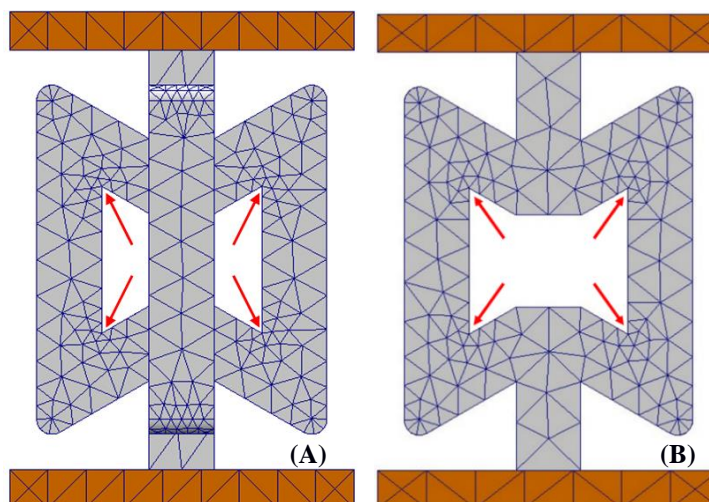


Figura 24. Malha aplicada (setas a vermelho a indicar as zonas com uma malha mais fina) – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant.

Assim, para analisar a influência não só em termos do material utilizado nas ET, mas também da sua espessura, efetuou-se vários testes de compressão. Para tal, recolheu-se os dados da tensão equivalente de *von Mises* e da deformação que se verificaram nas zonas críticas referidas anteriormente, de modo a criar as curvas de tensão-deformação nos diversos cenários.

De seguida, apresenta-se as curvas de tensão-deformação nominais da estrutura 3D *re-entrant* para três diferentes espessuras (t), sendo estas 1,4 mm (**Figura 25 (A)**), 1,7 mm (**Figura 25 (B)**) e 2,0 mm (**Figura 25 (C)**). A justificação para a escolha destas espessuras reside no facto de que, para um material flexível como o TPU, é difícil criar peças, através do processo FFF, com uma boa qualidade para espessuras inferiores a 1,2 mm; para além disso, o processo de impressão das ET para espessuras superiores a 2,4 mm afirma-se bastante complexo para as pequenas dimensões totais exigidas pela espessura da sola. Por sua vez, para cada uma das espessuras, realizou-se uma simulação, primeiramente, com o material TPU 85A e depois com TPU 95A.

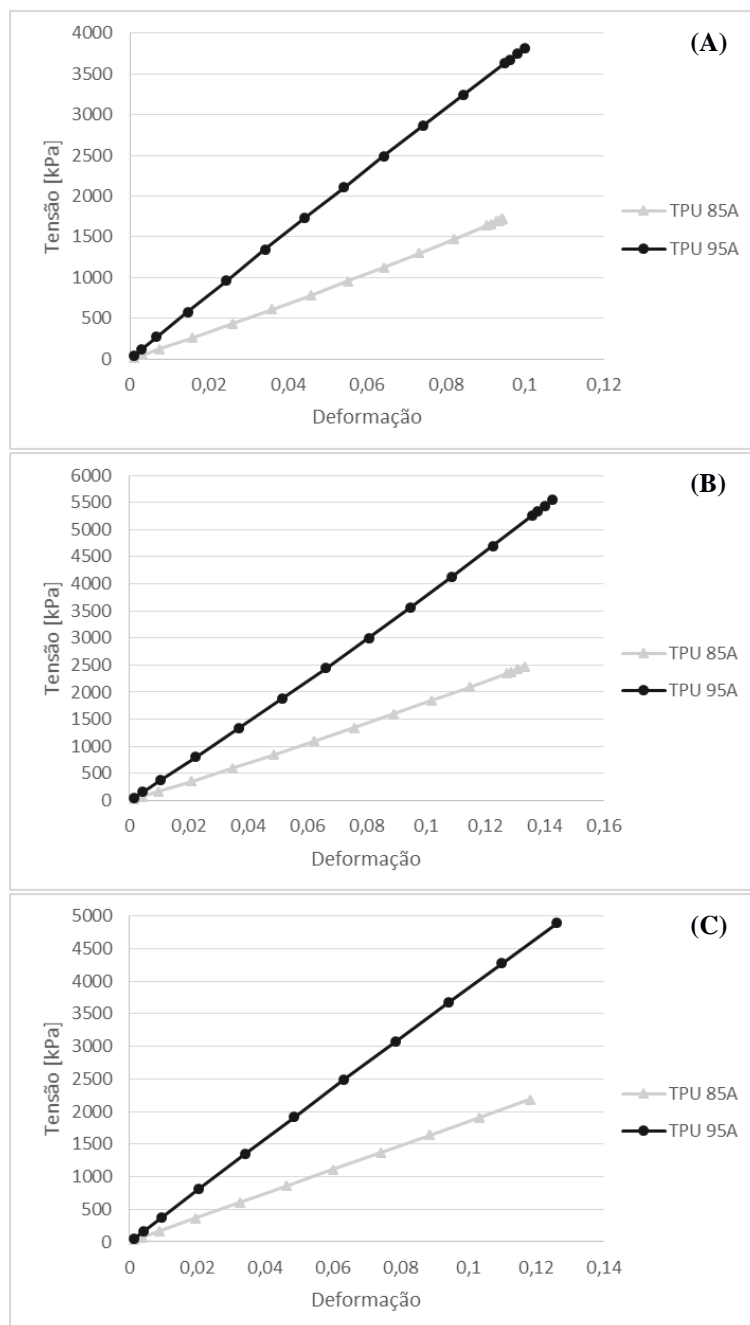


Figura 25. Curvas de tensão-deformação da estrutura 3D *re-entrant* – (A) espessura de 1,4 mm; (B) espessura de 1,7 mm; (C) espessura de 2,0 mm.

Após mostrar as curvas de tensão-deformação nominais da estrutura 3D *re-entrant*, apresenta-se, na **Figura 26**, as curvas de tensão-deformação nominais da estrutura 2D *re-entrant* para as mesmas condições de espessura e materiais.

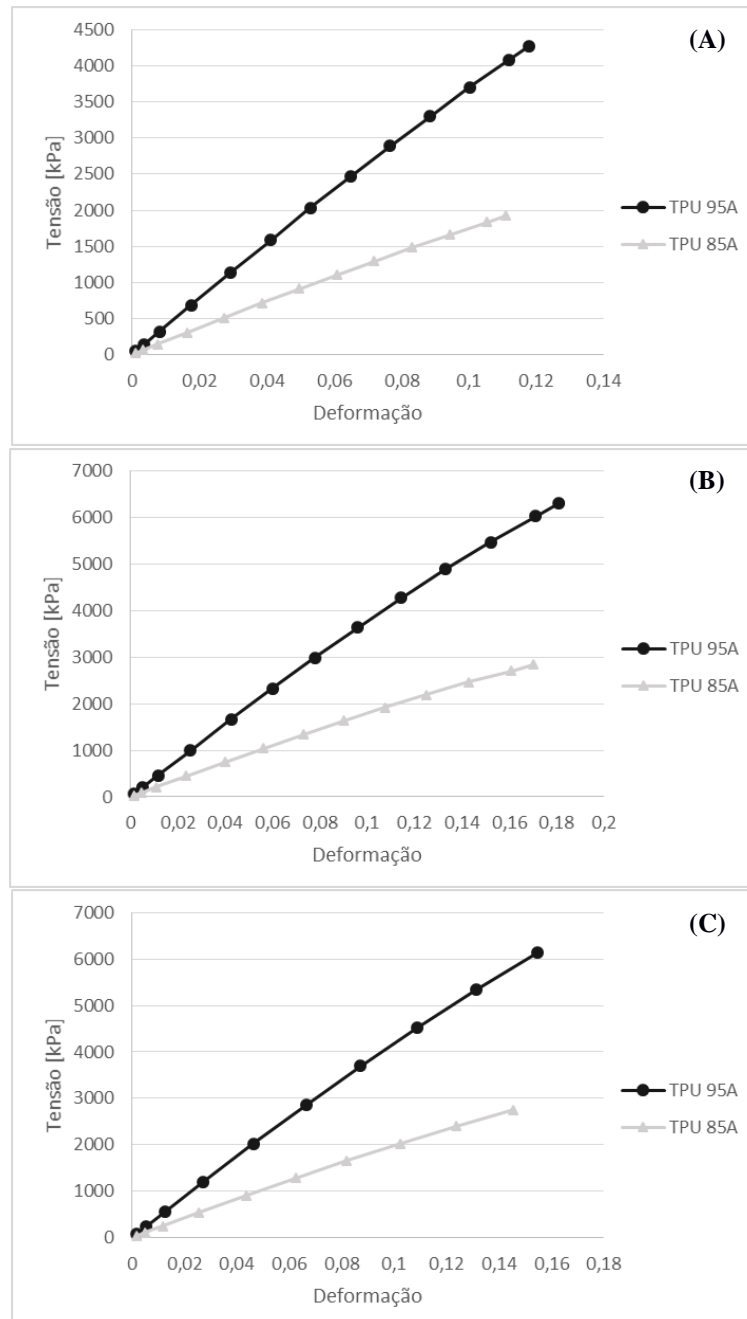


Figura 26. Curvas de tensão-deformação da estrutura 2D *re-entrant* – (A) espessura de 1,4 mm; (B) espessura de 1,7 mm; (C) espessura de 2,0 mm.

Primeiramente, é de realçar que ambas as estruturas com 2,0 mm de espessura entraram em contacto com os corpos rígidos superior e inferior ligeiramente antes de atingir o deslocamento de 1,7 mm, por isso, optou-se por retirar os resultados até ao momento antes deste acontecimento.

Analisando a **Figura 25** e **Figura 26**, verificou-se que todas as ET analisadas deformaram-se apenas elasticamente, tal como era pretendido. Para além disso, é de notar que, com a aplicação de um deslocamento de 1,7 mm na direção y, todas as ET de TPU 95A apresentam, aproximadamente, o dobro dos valores de tensão nas zonas críticas em comparação com as ET de TPU 85A, para uma deformação de apenas 10%, o que se reflete numa EA superior (indicada por uma maior área sob as curvas). Relativamente às três espessuras das ET, pode-se comprovar que com o aumento da espessura, os valores de tensão nas zonas críticas também tendem a aumentar. Por último, comparando as curvas de tensão-deformação da ET 3D *re-entrant* com as da ET 2D *re-entrant*, pode-se verificar que, dentro do intervalo dos valores de deformação que se analisaram, os valores de tensão nas zonas críticas não apresentam uma diferença muito significativa.

3.2.4 Seleção da estrutura a integrar na entressola

A partir das curvas de tensão-deformação obtidas, é possível calcular a EA, recorrendo-se à equação [2.1], e a EEA, utilizando-se a fórmula [2.2].

Na **Tabela 6** apresenta-se os valores da densidade relativa, da densidade da ET, da EA e da EEA, para todos os testes efetuados, até a uma deformação de 10%, de modo a que o intervalo em estudo seja igual para todas as ET.

Tabela 6. Dados relacionados com a AE de cada ET.

| Tipo de ET | Espessura (t) [mm] | Material | Densidade relativa | Densidade [kgm ⁻³] | EA [kJm ⁻³] | EEA [kJkg ⁻¹] |
|----------------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| ET 3D <i>re-entrant</i> | 1,4 | TPU 85A | 0,187 | 209,280 | 87,933 | 0,420 |
| | | TPU 95A | | 227,965 | | |
| | 1,7 | TPU 85A | 0,249 | 279,036 | 88,207 | 0,316 |
| | | TPU 95A | | 303,950 | | |
| | 2,0 | TPU 85A | 0,312 | 349,966 | 92,518 | 0,264 |
| | | TPU 95A | | 381,213 | | |
| ET 2D <i>re-entrant</i> | 1,4 | TPU 85A | 0,560 | 627,016 | 90,340 | 0,144 |
| | | TPU 95A | | 682,999 | | |
| | 1,7 | TPU 85A | 0,643 | 720,687 | 91,949 | 0,128 |
| | | TPU 95A | | 785,034 | | |
| | 2,0 | TPU 85A | 0,717 | 803,210 | 102,034 | 0,127 |
| | | TPU 95A | | 874,925 | | |

Para uma melhor comparação dos valores obtidos na **Tabela 6**, apresenta-se, de seguida, os dados da EA (**Figura 27 (A)**) e da EEA (**Figura 27 (B)**) em função da espessura e em formato de gráfico.

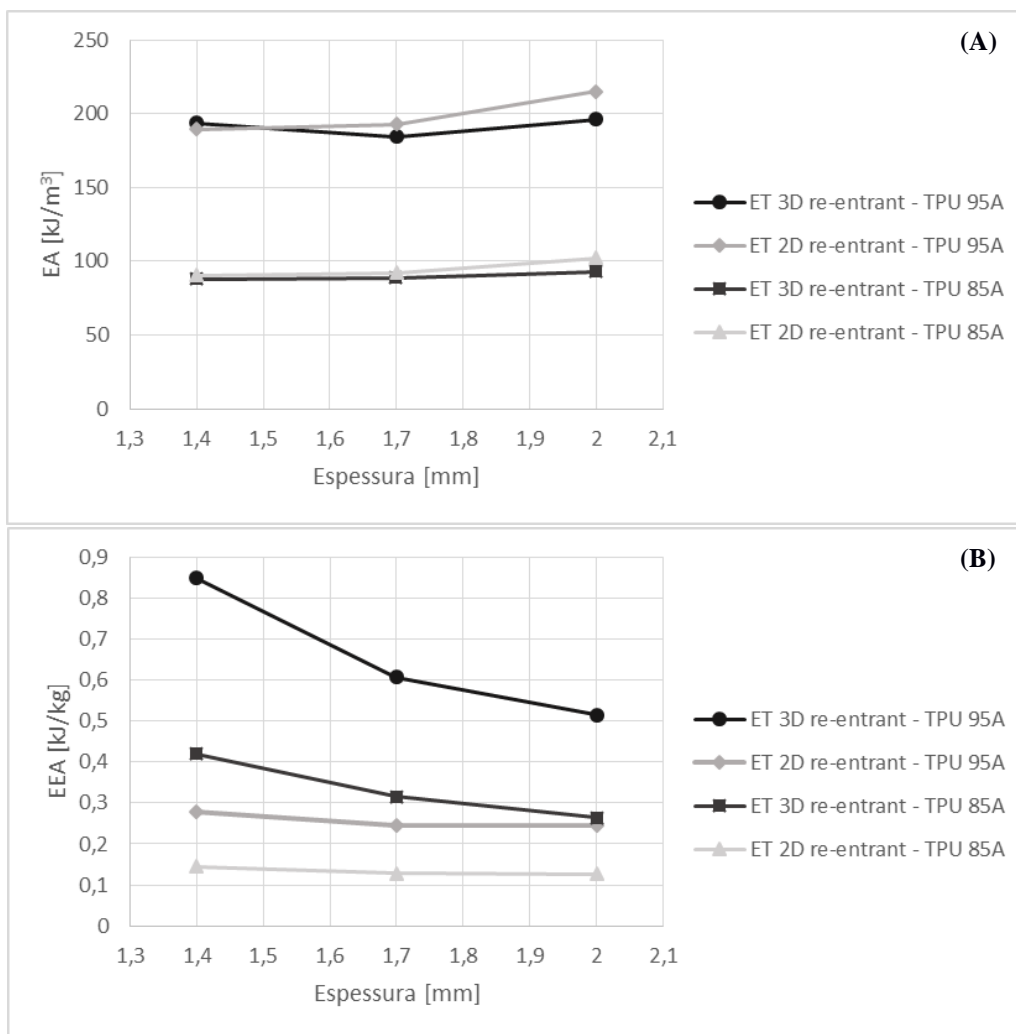


Figura 27. (A) Gráfico da EA de cada ET em função da espessura (t); (B) Gráfico da EEA de cada ET em função da espessura (t).

Através da análise **Figura 27 (A)**, é possível confirmar que a AE é melhor nas ET em TPU 95A do que nas ET em TPU 85A. Deste modo, decidiu-se usar o material TPU 95A para a realização das próximas análises numéricas e consequente fabrico da ET selecionada a integrar na entressola. Além disso, pode-se averiguar que a EA aumenta com o aumento da espessura e, em geral, a EA pela ET 2D *re-entrant* é superior à da ET 3D *re-entrant*, exceto para uma espessura de 1,4 mm.

A partir da **Figura 27 (B)**, verifica-se que, no caso do estudo da AE até uma deformação de 10%, a ET 3D *re-entrant* apresenta uma EEA superior à ET 2D *re-entrant*, especialmente quando esta apresenta valores de espessura baixos.

Posto isto, para auxiliar a escolha entre a ET 3D *re-entrant* e a ET 2D *re-entrant*, optou-se por realizar um último teste, sendo que na qual aplicou-se uma pressão no corpo rígido superior ao invés de um deslocamento.

Para a seleção do valor de pressão a aplicar, recorreu-se à distribuição de pressões no pé, presente no capítulo 2.4.2. Além disso, como o objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de uma entressola de uma sapatilha desportiva, decidiu-se ter como base os valores de pressão enquanto se está a correr apresentados na **Tabela 3**, fornecidos pelo artigo [39].

Deste modo, esta análise realizou-se com uma pressão de 354,2 kPa, sendo este o valor de pressão mais alto das seis regiões definidas no artigo [39] (valor de pressão correspondente à região posterior medial), e com uma espessura de 2,0 mm.

Na **Figura 28** apresenta-se o resultado final obtido, em termos de deformação e deslocamento na direção *y* e observadas, nas análises numéricas de ambas as ET.

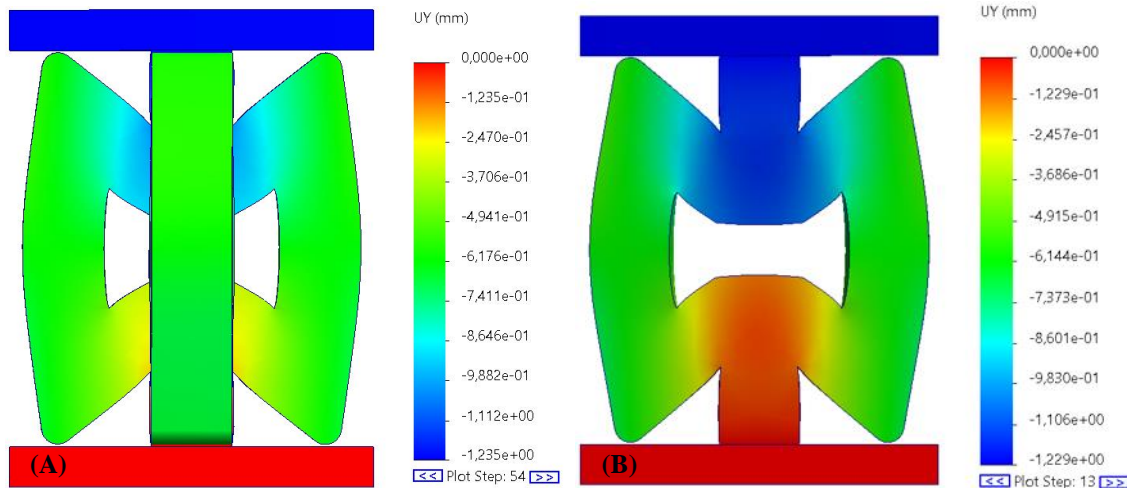


Figura 28. Deslocamento na direção *y* – (A) ET 3D re-entrant; (B) ET 2D re-entrant.

Com estas duas simulações finalizadas, concluiu-se que a ET 3D *re-entrant* com 2,0 mm de espessura não consegue suportar uma pressão superior a 175 kPa, uma vez que a simulação abortou antes de atingir 50% da pressão total aplicada e no momento em que a ET entra em contacto com ambos os corpos rígidos; enquanto a ET 2D *re-entrant* consegue suportar a pressão total de 354,2 kPa.

Por um lado, podia-se aumentar um pouco a espessura da ET 3D *re-entrant*, de modo a que esta suportasse uma pressão superior, contudo, associado a esta decisão estaria o facto de ser difícil a realização da impressão, através do processo FFF, desta ET com espessuras superiores a 2,4 mm, tal como foi referido anteriormente.

Por isso, a ET seleccionada para integrar na entressola é a ET 2D *re-entrant* de TPU 95A.

Por conseguinte, decidiu-se avaliar a ET escolhida em termos de otimizações a realizar ao nível da sua geometria, visto que, na **Figura 28**, a ET quase que entra em contacto com ambos os corpos rígidos quando se aplica a pressão de 354,2 kPa. Para além disso, verificou-se ainda que as zonas, indicadas com os círculos a vermelho na **Figura 29 (A)** e **Figura 29 (B)**, apresentam tensões praticamente nulas, não contribuindo para suportar a pressão a que toda a ET é sujeita.

Para tal, realizou-se uma análise para comparação entre a aplicação na zona em destaque de um filete de 0,4 mm (geometria prévia) e de um filete de 0,6 mm e confirmou-se que a diferença entre ambos para o deslocamento observado na direção *y* é quase nula (diferença de 0,002 mm), tal como se pode observar na **Figura 29 (C)** e **Figura 29 (D)**.

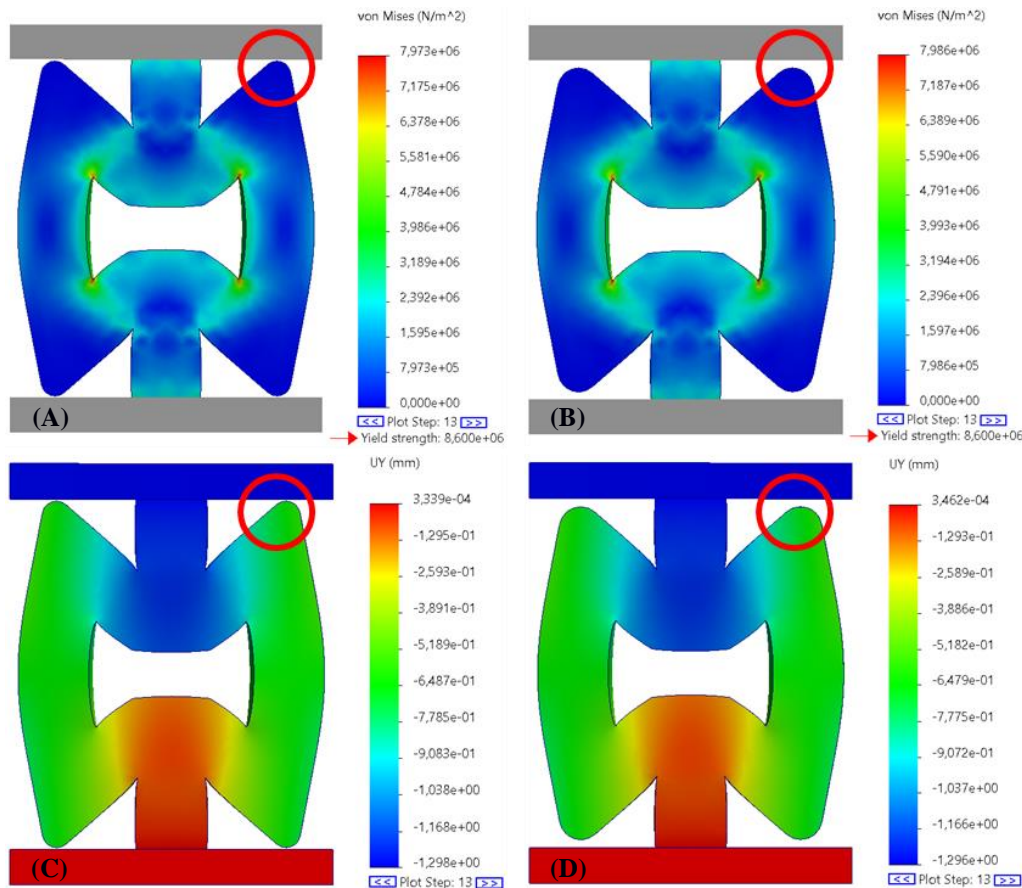


Figura 29. (A) Tensões na ET com filete de 0,4 mm; (B) Tensões na ET com filete de 0,6 mm; (C) Deslocamento na direção y na ET com filete de 0,4 mm; (D) Deslocamento na direção y na ET com filete de 0,6 mm (círculos a vermelho para facilitar a referência da região em específico).

Deste modo, efetuou-se a alteração na geometria para um filete de 0,6 mm, permitindo, assim, uma distância superior para prevenção do contacto entre a zona destacada na ET, quando esta se encontra compressa, e ambos os corpos rígidos.

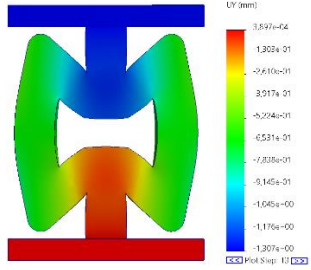
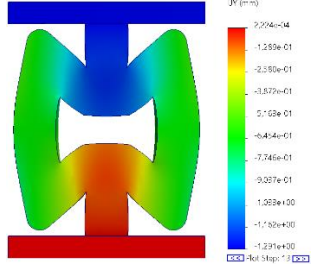
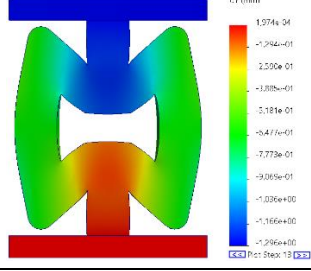
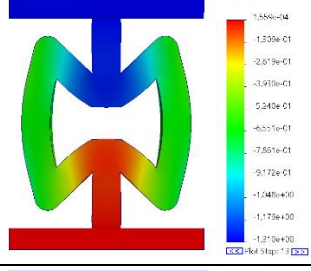
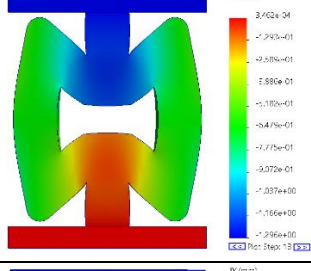
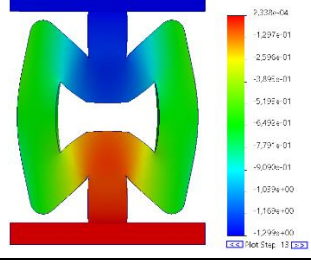
3.2.5 Análise da ET 2D re-entrant de acordo com a distribuição de pressões no pé

Após a escolha e otimização da ET para este caso de estudo, decidiu-se fazer várias análises numéricas tendo como base a distribuição de pressões na sola do pé do artigo [39] apresentada na **Tabela 3**, sendo que a razão para a escolha deste artigo é o facto de se enquadrar, em geral, com o objetivo deste trabalho e de se pretender dimensionar a ET interna da entressola de acordo com as pressões enquanto se está a correr.

Assim, de acordo com a pressão verificada em cada região da sola do pé, foi possível atribuir uma espessura adequada à ET 2D re-entrant, para que se verifique um amortecimento idêntico nas diversas regiões, durante as diferentes fases da corrida. A decisão de qual a espessura a aplicar a cada região teve em consideração que o deslocamento na direção y do corpo rígido superior apenas seria, aproximadamente, 1,3 mm (considerando-se um desvio-padrão de 0,01 mm).

De seguida, na **Tabela 7** apresenta-se a atribuição da espessura da ET de acordo com a pressão exercida numa determinada região do pé.

Tabela 7. Atribuição da espessura da ET de acordo com a distribuição de pressões na sola do pé.

| Região | Pressão [kPa] | Espessura (t) [mm] | Deslocamento (UY) [mm] | Imagem correspondente ao resultado final da simulação |
|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------|---|
| Anterior medial | 298,8 | 1,85 | 1,307 |  |
| Anterior central | 333,1 | 1,93 | 1,291 |  |
| Anterior lateral | 324,1 | 1,91 | 1,296 |  |
| Média | 114,8 | 1,32 | 1,310 |  |
| Posterior medial | 354,2 | 1,97 | 1,296 |  |
| Posterior central e lateral | 266,5 | 1,78 | 1,299 |  |

Assim, concluindo a seleção da espessura da ET, tendo em conta o deslocamento na direção y definido, é possível ter um amortecimento, aproximadamente, idêntico em todas as regiões da sola do pé.

Posto isto, calcula-se, de seguida, a EA, recorrendo-se à equação [2.1], e a EEA, utilizando-se a fórmula [2.2].

A **Tabela 8** apresenta os valores da densidade relativa, da densidade da ET, da EA e da EEA (obtidos a partir das zonas críticas referidas anteriormente), ao longo das seis regiões definidas na entressola.

Tabela 8. Dados relacionados com a AE para cada região da entressola.

| Região | Espessura (t) [mm] | Densidade relativa | Densidade [kgm ⁻³] | EA [kJm ⁻³] | EEA [kJkg ⁻¹] |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Anterior medial | 1,85 | 0,675 | 823,557 | 839,432 | 1,019 |
| Anterior central | 1,93 | 0,694 | 847,192 | 939,043 | 1,108 |
| Anterior lateral | 1,91 | 0,690 | 841,358 | 897,873 | 1,0672 |
| Média | 1,32 | 0,529 | 645,117 | 223,411 | 0,346 |
| Posterior medial | 1,97 | 0,704 | 858,711 | 1031,932 | 1,202 |
| Posterior central e lateral | 1,78 | 0,658 | 802,210 | 721,948 | 0,900 |

Através da **Tabela 8**, pode-se verificar que, ao contrário do verificado no capítulo 3.2.4, a EEA aumenta com o aumento da espessura da ET 2D *re-entrant*, uma vez que, para atingir o deslocamento na direção y de 1,3 mm, quanto maior for a espessura, maior são os valores de tensão e deformação verificados nas zonas críticas e na ET em geral, o que, por sua vez, contribui para uma EA mais elevada.

3.3 Aplicação da ET 2D *re-entrant* na entressola

Após a obtenção do modelo digital da entressola compacta e a seleção das espessuras da ET de acordo com a distribuição de pressões enquanto se está a correr, seguiu-se a modelação da entressola final, através da aplicação da ET 2D *re-entrant* no seu interior.

Primeiramente, para a realização da modelação da entressola, dividiu-se a mesma segundo as seis regiões apresentadas no artigo [39], tal como se pode observar na figura **Figura 30**.

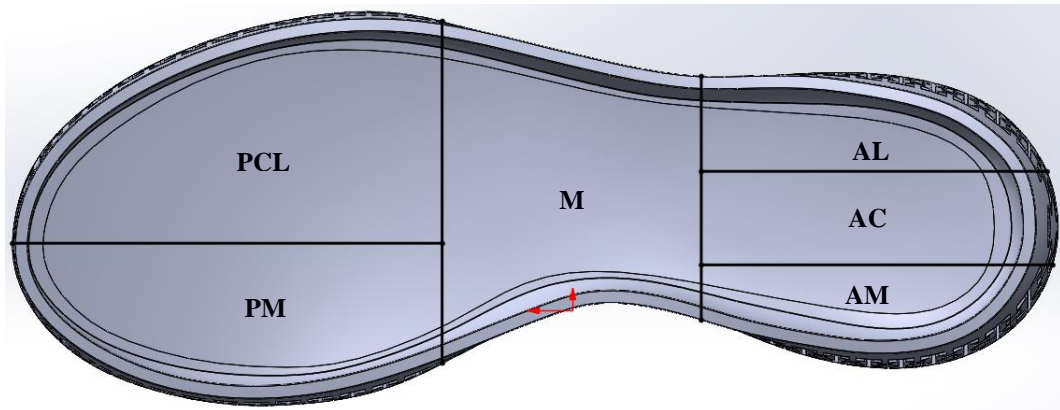


Figura 30. Divisão da sola em seis regiões (onde o significado de cada sigla é o seguinte: **PCL** - Posterior central e lateral, **PM** - Posterior medial, **M** - Média, **AL** - Anterior lateral, **AC** - Anterior central, **AM** - Anterior medial).

Em segundo lugar, modelou-se a ET com as diferentes espessuras seleccionadas para cada região. Além disso, é de realçar que teve-se em consideração a largura dos corpos rígidos utilizados ao longo das diversas simulações para a definição do espaçamento necessário entre as diversas colunas da ET e também a adaptação da ET à morfologia da entressola, aplicando-se duas camadas de ET na região anterior.

Por fim, deixou-se uma camada fina de 2 mm na parte superior e inferior da entressola, por forma a esta seja um pouco mais robusta.

Na **Figura 31** apresenta-se o modelo digital da entressola final, com três vistas do mesmo.

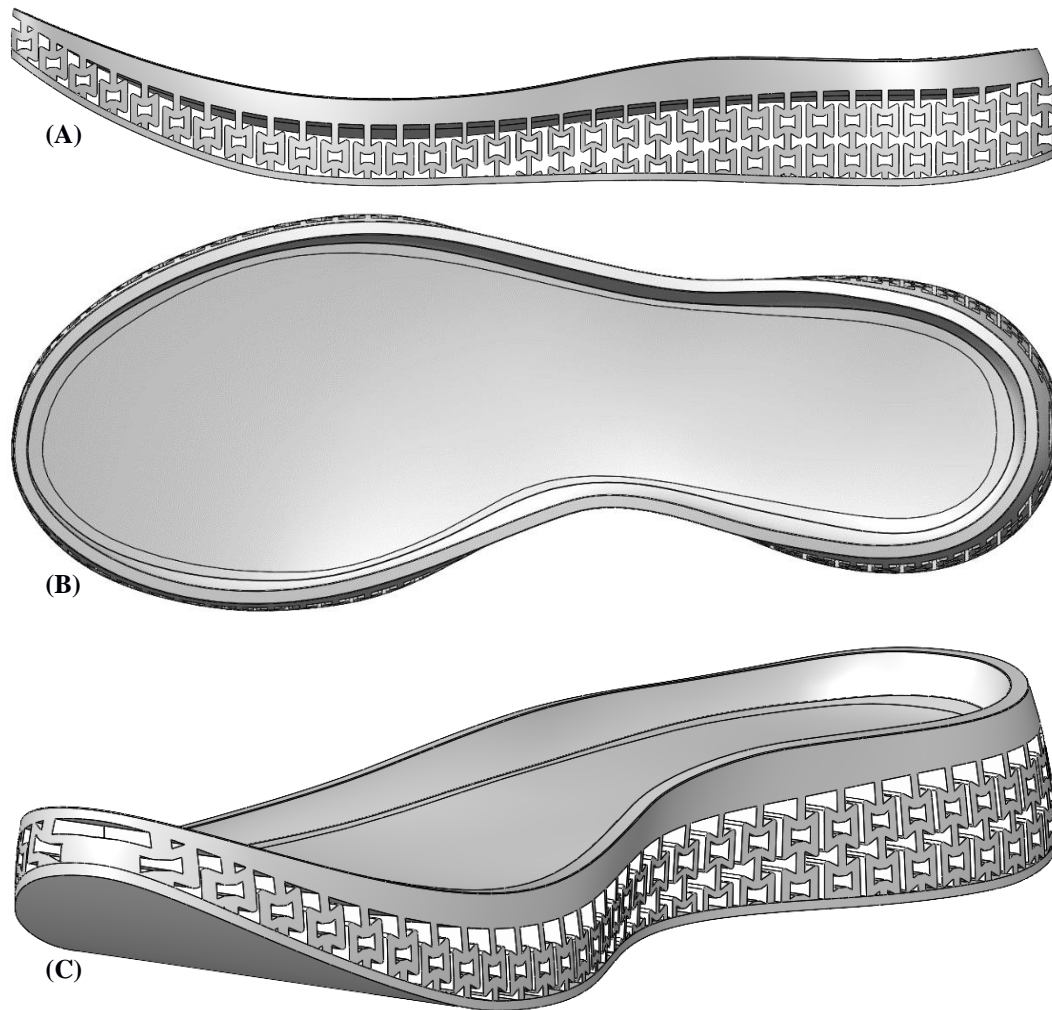


Figura 31. Modelo digital da entressola final – (A) Vista lateral; (B) Vista de cima; (C) Vista isométrica.

3.4 Obtenção do modelo físico da entressola final

Tal como se referiu anteriormente, o FA de peças a partir do material TPU está associado à dificuldade da sua obtenção com um bom acabamento superficial. Deste modo, decidiu-se, antes de imprimir o modelo físico da entressola final, tentar obter com sucesso uma amostra da ET 2D *re-entrant* com uma boa fiabilidade de reprodução dos detalhes finos, de modo a estabelecer as definições de impressão a usar no modelo físico da entressola final.

Para a produção, não só da amostra da ET 2D *re-entrant*, mas também do modelo físico da entressola, recorreu-se ao processo de FFF devido às razões apresentadas no capítulo 2.1.1, sendo que o equipamento de fabrico foi a impressora Creality 3D Ender-3 V2. No que diz respeito à preparação de ambos para fabrico utilizou-se o *software* Ultimaker Cura.

Na **Figura 32** encontra-se a preparação e impressão a amostra da ET 2D *re-entrant*.

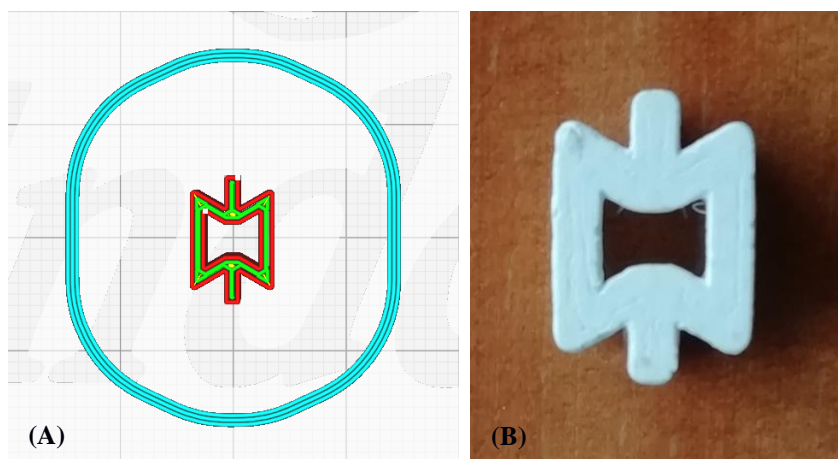


Figura 32. Amostra da ET 2D re-entrant – (A) Preparação através do software Ultimaker Cura; (B) Impressão a partir do processo FFF.

Em relação às definições de impressão da amostra, verificou-se que, após algumas tentativas, se conseguiu obter um bom resultado final com os valores apresentados na **Tabela 9**. É de referir ainda que utilizou-se uma espessura de parede de 0,8 mm e o tipo de *infill* considerado para as ET foi o *Cubic* (de notar que, para este caso de estudo, o *infill* apresenta uma influência reduzida devido às reduzidas dimensões das ET).

Tabela 9. Definições estabelecidas para a impressão do modelo físico da entressola.

| Material utilizado | Velocidade de impressão | Temperatura de impressão | Temperatura da mesa de trabalho | <i>Infill</i> |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------|
| TPU 95A | 25 m/s | 235 °C | 55 °C | 50 % |

Deste modo, decidiu-se aplicar os mesmos valores apresentados na **Tabela 9**, para a impressão do modelo físico da entressola.

No entanto, como as dimensões do local de trabalho (220 x 220 x 250 mm) são inferiores às dimensões da entressola final seria necessário dividir a entressola em duas partes e o tempo total de impressão da entressola na sua totalidade com os devidos suportes seria, aproximadamente, 6 dias e 6 horas (com um peso total de material gasto de 454 g). É de realçar ainda que o modelo físico da entressola apresenta um peso total de, aproximadamente, 350 g. Deste modo, optou-se por produzir apenas a porção destacada a vermelho na **Figura 33**, onde o tempo de impressão foi 1 dia e 8 horas e o peso do material gasto, incluindo um suporte, foi 98g.

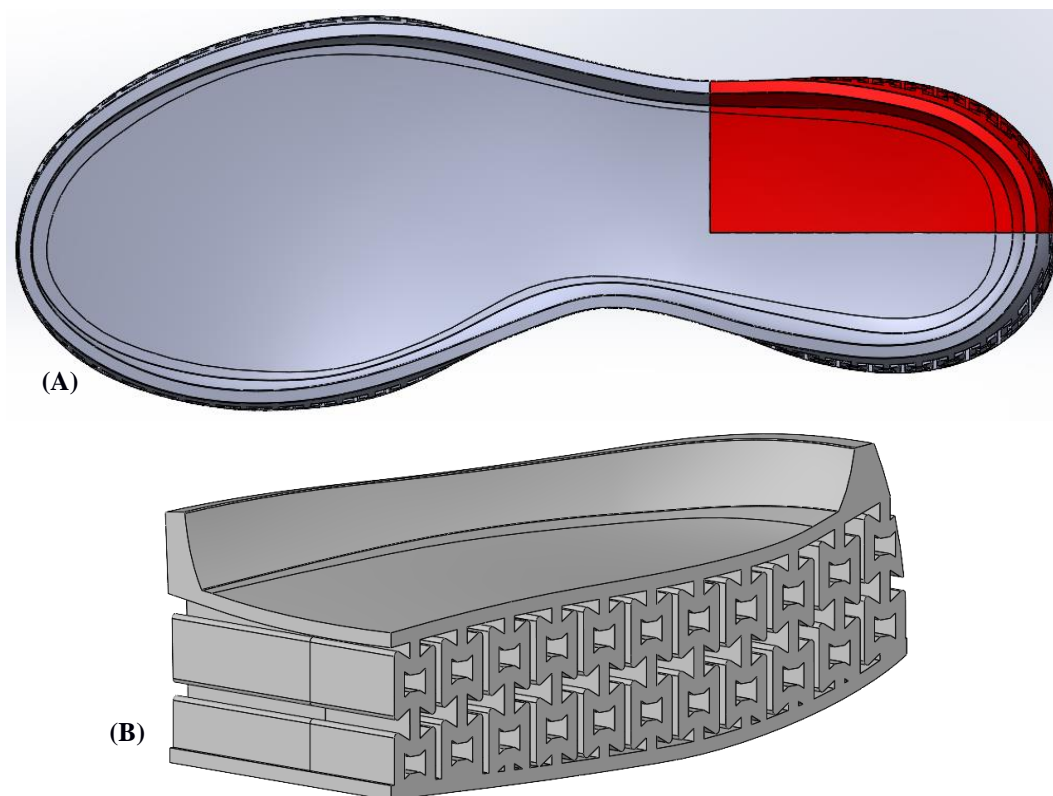


Figura 33. (A) Entressola com porção a imprimir destacada a vermelho; (B) Vista isométrica da porção da entressola a imprimir.

Primeiramente, exportou-se em formato STL a porção da entressola pretendida a fabricar.

Posto isto, preparou-se a porção da entressola no *software* Ultimaker Cura, inserindo-se os valores das definições de impressão apresentados na **Tabela 9** e optando-se pela orientação apresentada na **Figura 34**, visto que, assim, é possível a impressão sem a criação de suportes no interior da ET e com apenas um suporte na parte superior da entressola.

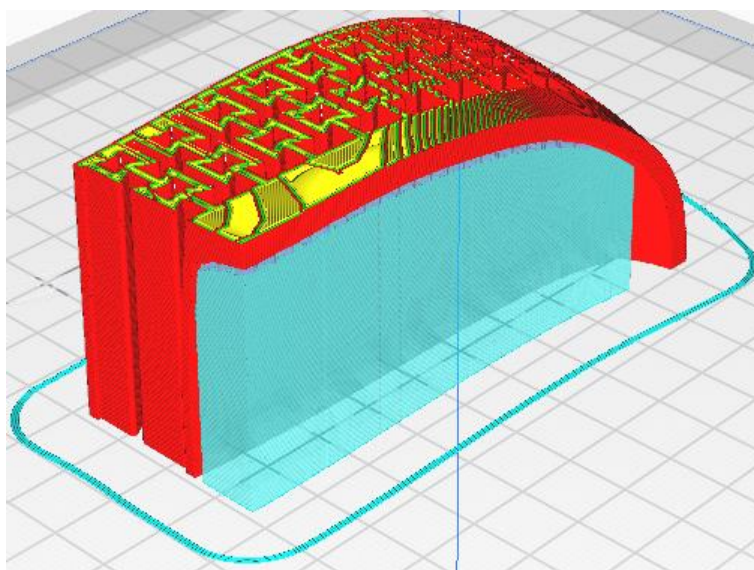


Figura 34. Porção da entressola preparada para impressão.

Por fim, após a remoção do suporte localizado na parte superior da entressola, foi possível obter a porção do modelo físico da entressola final, estando este apresentado em três vistas diferentes na **Figura 35**.

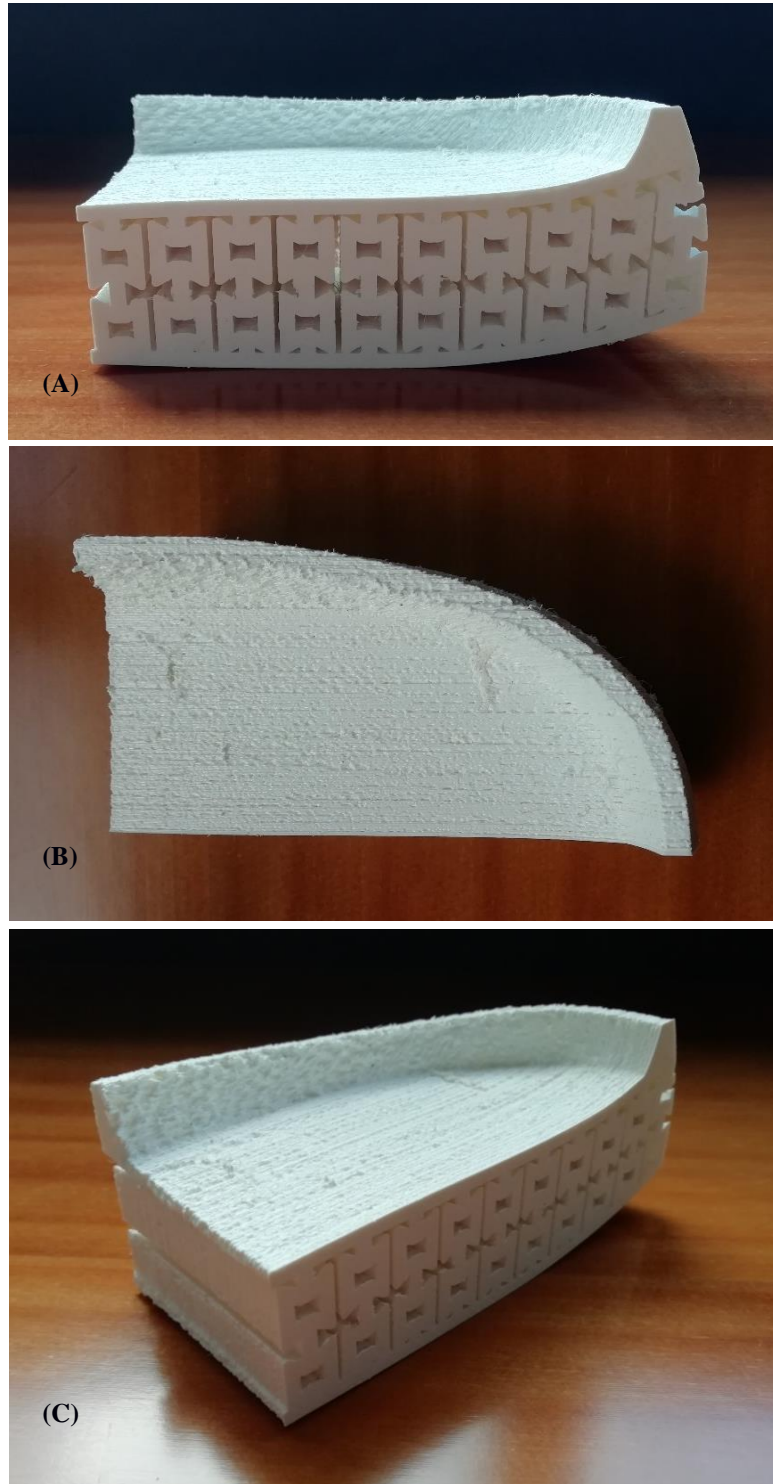


Figura 35. Porção do modelo físico da entressola final – (A) Vista lateral; (B) Vista de cima; (C) Vista isométrica.

4 Análise de resultados e discussão

Dando por concluído processo de engenharia inversa, verifica-se que foi possível a obtenção de uma entressola com propriedades diferentes em diversas regiões, respondendo, assim, a um dos problemas da grande maioria das sapatilhas desportivas fabricadas por processos convencionais.

Posto isto, neste capítulo analisa-se a entressola desenvolvida ao longo desta dissertação em termos da sua AE e da sua impressão.

No que diz respeito à AE, confirmou-se que a ET 2D *re-entrant* e as ET auxéticas em geral desempenham um bom trabalho em termos de AE de impacto, o que revela a sua viabilidade de utilização não só em sapatilhas desportivas, mas também em outros produtos na indústria do calçado.

De seguida, realiza-se uma comparação entre a AE das ET de TPU 95A desenvolvidas para as diferentes regiões da entressola e obtidas por FA com a AE habitual das entressolas de EVA produzidas a partir de processos convencionais. Tal como foi referido no capítulo 2.4.3, a EVA é dos materiais mais usados para o fabrico de entressolas e, normalmente, apresenta uma densidade que varia entre 150 e 250 kg/m³ [46].

À semelhança das análises numéricas realizadas nesta dissertação, no artigo [47] verificou-se que, a partir de testes quasi-estáticos, uma amostra de EVA de densidade 170 kg/m³ apresenta uma EA de 20 kPa/m³ e uma EEA de 0,12 kPa/kg; e uma amostra de EVA de densidade 220 kg/m³ apresenta uma EA de 100 kPa/m³ e uma EEA de 0,45 kPa/kg.

Deste modo, comparando os valores apresentados na **Tabela 8** com os valores de AE da EVA apresentados no artigo [47], é possível concluir que as ET em TPU 95A desenvolvidas e, por conseguinte, a entressola final apresentam uma AE eficaz.

No entanto, em termos de peso total da entressola não se conseguiu atingir um resultado aceitável, visto que uma entressola em EVA apresenta, normalmente, um peso inferior a 200 g, enquanto que a entressola desenvolvida nesta dissertação apresenta um peso de 350 g.

Em relação a algumas sapatilhas desportivas obtidas por FA, como é o caso da sapatilha 4DFWD da Adidas (**Figura 8**), pode-se verificar as ET desenvolvidas para entressola desta dissertação apresentam uma densidade superior, o que, possivelmente, conduz não só a uma EEA inferior, mas também a um peso superior.

Em relação à obtenção da porção do modelo físico da entressola final, conclui-se que, em geral, se conseguiu alcançar um resultado final aceitável com a sua impressão através do processo FFF, tal como se pode observar na **Figura 35**. Os únicos problemas associados a este processo de FA foram a dificuldade de extração do suporte localizado na parte superior da entressola e um ligeiro aparecimento do efeito de *stringing* (ou seja, aparecimento de filamentos finos de material) no interior da ET.

Apesar de existirem processos de FA com um nível superior em termos de fiabilidade de reprodução de pequenos detalhes e precisão (tais como, o processo DLS utilizado para o fabrico das sapatilhas 4DFWD), a utilização do processo FFF revelou ser uma boa solução para este caso de estudo.

Por fim, e de uma forma geral, pode-se concluir que se conseguiu atingir resultados aceitáveis e promissores tanto ao nível da AE da entressola como da sua impressão.

5 Conclusão

A presente dissertação consistiu no desenvolvimento de uma entressola com uma ET interna, onde a sua principal função é a AE aquando do impacto. Para isso, selecionou-se a sola, mais concretamente a entressola, de uma sapatilha desportiva como o modelo para o levantamento da forma. As tecnologias utilizadas para a aquisição de forma foram a tecnologia de apalpação por laser e a tecnologia de luz estruturada. A partir deste modelo foi possível obter, por engenharia inversa, o modelo digital da entressola compacta.

De seguida, estudou-se, através de análises quasi-estáticas não-lineares, duas ET auxéticas (a ET 3D *re-entrant* e a ET 2D *re-entrant*), caracterizadas por apresentarem uma *performance* de AE superior em relação a ET não-auxéticas.

Comparando as duas ET auxéticas, concluiu-se que, de acordo com a distribuição de pressões enquanto se está a correr, a ET 2D *re-entrant* revelou um melhor desempenho em termos do seu comportamento em comparação com a ET 3D *re-entrant*, sendo, por isso, a ET selecionada para este caso de estudo.

Posto isto, após dividir a sola do pé em seis regiões, variou-se a espessura da ET selecionada e estabeleceu-se a espessura adequada de acordo com a pressão máxima a que cada região está sujeita, de modo a que a entressola apresentasse um amortecimento idêntico nas diversas regiões, durante as diferentes fases da corrida.

Após a modelação da entressola na sua totalidade com a ET interna selecionada, imprimiu-se uma porção da entressola, através do processo FFF e com o recurso ao material escolhido, o TPU 95A, onde se verificou que a partir de ambos é possível obter uma entressola com uma boa fiabilidade em termos do fabrico dos pequenos detalhes da ET e com uma boa AE do impacto. No entanto, com algumas limitações no que se refere ao peso total da entressola (peso demasiado elevado em comparação com o de outras sapatilhas desportivas com entressola em EVA).

Em relação ao processo FFF, este revela-se como um processo bastante acessível e, economicamente, de baixo custo, o que pode contribuir para a sua aplicação num mercado competitivo como o da indústria do calçado.

Por fim, tendo por base os princípios apresentados ao longo desta dissertação, bem como os resultados alcançados, é possível aferir que o desenvolvimento de entressolas que têm em consideração a distribuição de pressões e as preferências do indivíduo pode tornar-se uma realidade num futuro próximo da indústria do calçado.

6 Trabalhos futuros

Em relação aos trabalhos futuro, propõem-se a realização de análises dinâmicas não-lineares, a partir das quais seria possível obter resultados que permitiriam efetuar um estudo comparativo com os resultados obtidos nas análises quasi-estáticas não-lineares ao longo desta dissertação. Teoricamente, as análises dinâmicas permitiriam obter valores da AE mais realistas, o que, por sua vez, teria impacto no dimensionamento da ET a integrar na entressola.

Para além disso, seria também interessante efetuar a impressão da entressola na sua totalidade. Desta forma, seria possível a realização de dois ensaios experimentais dinâmicos de impacto, um com a entressola impressa e outro com a entressola da sapatilha convencional selecionada.

Por fim, sugere-se para um trabalho futuro, o dimensionamento das ET tendo em conta as pressões realizadas durante a prática de uma determinada atividade física, de modo a ser possível a obtenção por FA da entressola com ET otimizadas para essa atividade em específico.

7 Referências

- [1] Website: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (consultado a 15 de abril de 2022).
- [2] Ramos, A. Relvas, C. Simões, J. Mota, L. (2017). *Engenharia+Design: da ideia ao produto*. 1ª edição, Pubblindústria. Porto.
- [3] Website: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion> (consultado a 10 de maio de 2022).
- [4] Website: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (consultado a 20 de maio de 2022).
- [5] Durakovic, B. (2018). *Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges*. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. pp. 179-191.
- [6] Félix da Silva, S. (2019). *Design para fabrico aditivo: Contributos de uma mudança de paradigma construtivo para a prática do designer*. Tese de Doutoramento em Design, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- [7] Website: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/cellular-solids/introduction/BA4DB390F62F3BE666C90AFC24B79159#access-block> (consultado a 12 de junho de 2022).
- [8] Park, K. Min, K. Roh, Y. (2021). *Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements*. *Materials*. 15, 97.
- [9] Pan, C. Han, Y. Lu, J. (2020), *Design and Optimization of Lattice Structures: A Review*. *Applied Sciences*. 10, 6374.
- [10] Website: <https://www.ntop.com/resources/blog/guide-to-lattice-structures-in-additive-manufacturing/#benefits-&-applications-of-lattice-structures> (consultado a 25 de julho de 2022).
- [11] Tao, W. Leu, M. (2016). *Design of lattice structure for additive manufacturing*. *International Symposium on Flexible Automation*.
- [12] Helou, M. Kara, S. (2018) *Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31:3, 243-261.
- [13] Yin, H. Zhang, W. Zhu, Meng, F. Liu, J. Wen, G. (2022). *Review on lattice structures for energy absorption properties*. *Composite Structures*.
- [14] Website: <https://www.ntop.com/resources/case-studies/cold-plate-automotive-power-electronics/> (consultado a 10 de abril de 2023).
- [15] Website: <https://nanohive.com/> (consultado a 20 de abril de 2023).
- [16] Website: <https://posedla.com/> (consultado a 24 de abril de 2023).
- [17] Website: <https://www.ge.com/news/reports/thats-hot-this-lung-inspired-3d-printed-part-for-cooling-co2-could-take-power-generation-to-the-next-level> (consultado a 28 de abril de 2023).
- [18] Website: <https://www.adidas.co.uk/4dfwd-running> (consultado a 5 de maio de 2023).
- [19] Wu, Y. Fang, J. Wu, C. Li, C. Sun, G. Li, Q. (2023). *Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption*. *International Journal of Mechanical Sciences*.
- [20] Ozdemir, Z. Hernandez-Nava, E. Tyas, A. Warren, J. Fay, S. Goodall, R. Todd, I. Askes, H. (2015). *Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments*. *International Journal of Impact Engineering*. 49–61.

- [21] Fíla, T. Zlámal, P. Jirousek, O. Falta, J. Koudelka, P. Kytýr, D. Doktor, T. Valach, J. (2017). *Impact Testing of Polymer-filled Auxetics Using Split Hopkinson Pressure Bar. Advanced engineering materials.* 19.
- [22] Francisco, M. Pereira, J. Oliver, G. Roque da Silva, L. Cunha Jr. S. Gomes, G. (2022). *A review on the energy absorption response and structural applications of auxetic structures. Mechanics of Advanced Materials and Structures.* 29:27, 5823-5842.
- [23] Logakannana, K. Ramachandran, V. Rengaswamy, J. Ruana, D. (2020). *Dynamic Performance of a 3D Re-entrant Structure. Mechanics of Materials.*
- [24] Willwacher, S. Weir, G. (2023). *The future of footwear biomechanics research. Footwear Science,* 15:2, 145-154.
- [25] Asplund, C. Brown, D. (2005) *The Running Shoe Prescription. The Physician and Sportsmedicine,* 33:1, 17-24.
- [26] Website: https://www.shoeguide.org/shoe_anatomy/ (consultado a 28 de maio de 2023)
- [27] Ramsey, C. Peterson, B. Hébert-Losier, K. (2023). *Measurement and reporting of footwear characteristics in running biomechanics: A systematic search and narrative synthesis of contemporary research methods. Sports Biomech.* 22(3):351-387.
- [28] Sánchez-Ramírez, C. Ramsey, C. Palma-Oyarce, V. Herrera-Hernández, E. Aedo-Muñoz, E. (2023). *Heel-to-toe drop of running shoes: a systematic review of its biomechanical effects, Footwear Science.* 15:2, 77-101.
- [29] Marchena-Rodríguez, A. Ortega-Avila, A. Cervera-Garvi, P. Cabello-Manrique, D. Gijon-Nogueron, G. (2020). *Review of Terms and Definitions Used in Descriptions of Running Shoes. Internacional. Journal of Environmental Research and Public Health.* 17, 3562.
- [30] Sun, X. Lam, W. Zhang, X. Wang, J. Fu, W. (2020). *Systematic Review of the Role of Footwear Constructions in Running Biomechanics: Implications for Running-Related Injury and Performance. Journal of Sports Science and Medicine.* 19, 20-37.
- [31] Besson, T. Morio, C. Millet, G. Rossi, J. (2019). *Influence of shoe drop on running kinematics and kinetics in female runners. European Journal of Sport Science.* 19:10, 1320-1327.
- [32] Website: <https://runrepeat.com/guides/heel-to-toe-drop> (consultado a 16 de junho de 2023).
- [33] Website: <https://www.runningshoesguru.com/content/anatomy-of-a-running-shoe-with-infographic/> (consultado a 18 de junho de 2023).
- [34] Seeley, R. Tate, P. Stephens, T. (2007). *Anatomy and Physiology.* 6ª edição. McGraw- Hill. Boston. pp. 242-244.
- [35] Cavanagh, P. Rodgers, M. Liboshi, A. (1987). *Pressure Distribution under Symptom-Free Feet during Barefoot Standing. Foot & Ankle International.* 7: 262.
- [36] Bisiaux, M. Moretto, P. (2008). *The effects of fatigue on plantar pressure distribution in walking. Gait & Posture.* 693–698.
- [37] Segal, A. Rohr, E. Orendurff, M. Shofer, J. O'Brien, M. Sangeorzan, B. (2004). *The Effect of Walking Speed on Peak Plantar Pressure. Foot & Ankle International.*
- [38] Chuckpaiwong, B. Nunley, J. Mall, N. Queen, R. (2008). *The effect of foot type on in-shoe plantar pressure during walking and running. Gait & Posture.* 405–411.
- [39] Tessutti, V. Ribeiro, A. Trombini-Souza, F. Sacco, I. (2012). *Attenuation of foot pressure during running on four different surfaces: asphalt, concrete, rubber, and natural grass. Journal of Sports Sciences.* 30:14, 1545-1550.
- [40] Ho, I. Hou, Y. Yang, C. Wu, W. Chen, S. Guo, L. (2010). *Comparison of plantar pressure distribution between different speed and incline during treadmill jogging. Journal of Sports Science and Medicine.* 9, 154-160.

- [41] Eils, E. Strey, M. Linnenbecker, S. Thorwesten, L. Völker, K. Rosenbaum, D. (2001). *Characteristic Plantar Pressure Distribution Patterns During Soccer-Specific Movements. The American Journal of Sports Medicine*. Vol. 32, No. 1.
- [42] Website: <https://shoemakersacademy.com/cold-cement-vs-vulcanized-shoe-construction/> (consultado a 23 de junho de 2023).
- [43] Website: <https://shoemakersacademy.com/shoe-materials-eva-midsoles/> (consultado a 27 de junho de 2023).
- [44] SmarTech Analysis. (2019). *3D Printing in Footwear*.
- [45] Website: <https://news.adidas.com/futurecraft/adidas-unveils-industry-s-first-application-of-digital-light-synthesis-with-futurecraft-4d/s/20b2ff0a-4c7d-47a2-9beb-3373f6a5dad7> (consultado a 11 de julho de 2023).
- [46] Verdejo, R. Mills, N. (2002); *Performance of EVA foam in running shoes. The Engineering of Sport 4*. pp. 580-587.
- [47] Ramirez, B. Gupta, V. (2018). *Energy Absorption and Low Velocity Impact Response of Open-Cell Polyurea Foams*. University of California. Los Angeles.