Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Manuel de Freitas Cunha

Impressão 3D de Estruturas Híbridas

Tese de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professora Doutora Olga Machado de Sousa Carneiro

Professor Doutor Alexandre Ferreira da Silva

Outubro de 2019

“Estudem sem pensar, e serão cegos;

Pensem sem estudar, e estarão em perigo.”

Confúcio

AGRADECIMENTOS

No culminar desta longa caminhada, torna-se imperativo invocar em primeiro lugar os meus pais que ao longo da sua vida, da minha vida, tudo fizeram para me poder proporcionar um futuro auspicioso.

A sua constante preocupação, como pedra basilar, em me incutir bons princípios e valores, certamente foram preponderantes no meu crescimento como pessoa, como ser humano.

Ser-vos-ei eternamente grato pelo amor, dedicação, sangue, suor e lágrimas ao longo de todos estes anos.

O culminar desta etapa será a derradeira coroação de todo esse sacrifício.

Jamais poderia deixar de fazer a minha humilde homenagem a todos os professores que ao longo de toda a minha vida contribuíram para a minha formação académica e para a minha formação como cidadão.

Certamente uma das profissões mais nobres, certamente uma das profissões mais importantes nos alicerces de uma sociedade que se quer verdadeiramente equitativa, livre e virtuosa.

De igual forma importantes, aos meus tutores, com quem tive o privilégio e a honra de poder trabalhar, agradeço a orientação exemplar pautada por um elevado e rigoroso nível científico, um interesse permanente, uma visão crítica e oportuna, um empenho inexcedível e saudavelmente exigente, os quais contribuíram de uma forma clara e preponderante em todas as etapas do trabalho realizado.

A educação é a arma mais poderosa que podemos usar para mudar o mundo.

Muito obrigado a todos os meus professores.

RESUMO

Nos dias de hoje, é indiscutível o impacto e a forma como a impressão 3D está presente no nosso dia-a-dia. Munida de uma infinita liberdade de *design*, com capacidade de produzir objetos usando diversos materiais, despoletou um enorme interesse em diversas áreas industriais. Com o seu surgimento, tornou-se possível manipular e imitar estruturas multi-escala, multimateriais e multifuncionais encontradas na natureza – biomimetismo. Pelo facto de o biomimetismo ser uma tecnologia centrada na ideia de que não existe melhor modelo do que a natureza para desenvolver algo novo, conjugando-a com a utilização de ferramentas de manufatura aditiva poderá abrir caminho para a produção de materiais bioinspirados, que superem os materiais sintéticos dos dias de hoje.

A impressão 3D de filamento fundido (FFF), apresenta um grande potencial em replicar estruturas bioinspiradas, tendo levado diversos investigadores a desenvolver estruturas compósitas multimaterial fruto da forte procura por novos paradigmas de *design* e desenvolvimento de materiais estruturais avançados de alto desempenho.

Neste contexto, a presente dissertação, teve como objetivo avaliar o potencial do processo FFF multi-material, para a produção de estruturas técnicas híbridas, que poderão ou não ser incorporadas em laminados compósitos. O primeiro passo foi dado através de uma pesquisa bibliográfica sobre o processo de impressão 3D FFF multi-material, e a possibilidade de utilizar materiais compósitos na impressão de estruturas híbridas.

Posteriormente, recorrendo ao uso do processo de soldadura topo-a-topo, foram pré-selecionados três pares híbridos a serem replicados pelo processo de impressão 3D dando posteriormente origem a uma estrutura híbrida. Após a seleção do melhor par híbrido, Nylon-Ninjaflex, foram desenhados e impressos cinco provetes híbridos e cinco provetes contendo unicamente uma componente rígida, por forma a permitir obter um termo de comparação e possíveis conclusões acerca do desempenho mecânico destas estruturas.

Realizadas as impressões, com sucesso, os provetes foram submetidos a ensaios de flexão e impacto, demonstrando uma excelente adesão e coesão entre camadas. Face aos resultados obtidos, foi possível comprovar a eficácia do método adotado na seleção de pares de materiais e no estudo de resolução do equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: FFF multi-material, Compósitos, Estruturas hierárquicas.

ABSTRACT

In the present day, the impact of 3D printing and the way in which it is present in everyday life is indisputable. Provided with an infinite freedom of design, with the capacity of producing objects using diverse materials, it has garnered an enormous amount of interest from various areas of industry. With such a rise, it has become possible to manipulate and imitate the multi-scale, multi-material and multi-functional structures of nature – biomimicry. Due to biomimicry being a technology centred on the concept that there exists no better model than nature for developing a new product, combining it with the use of additive manufacturing tools will pave the way towards the production of bioinspired materials which improve upon the synthetic materials of today.

Fused filament fabrication 3D printing (FFF) presents great potential for replicating bioinspired structures, having brought various researchers to developing multimaterial composite structures, the product of the tireless search for new paradigms of design and the development of high-performance advanced structural materials.

In this context, the present dissertation has as its main objective to evaluate the potential of the multimaterial FFF process for the production of hybrid technical structures, which may or may not be incorporated into laminate composites. The first step was a bibliographic investigation into the process of multimaterial FFF 3D printing, and the possibility of utilizing composite materials in the printing of hybrid structures.

Subsequently, implementing the use of hot plate welding, three hybrid pairs were preselected to be replicated by the 3D printing process, subsequently giving rise to a hybrid structure. After selecting the best hybrid pair, Nylon-Ninjaflex, five hybrid test pieces and five test pieces containing solely a rigid component were designed and printed, to provide a basis for comparison and possible conclusions about the mechanical performance of these structures.

After printing, the specimens were successfully subjected to bending and impact tests, demonstrating excellent adhesion and cohesion between layers. Given the results obtained, it was possible to prove the effectiveness of the adopted method in the selection of pairs of material and in the study of equipment resolution.

KEYWORDS: Multi-material FFF, Composites, Hierarchical Structures.

ÍNDICE

Agradecimentos v
Resumo vii
Abstract ix
Índice de Figuras xiii
Índice de Tabelas xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos xix
1. Introdução 1
1.1 Enquadramento 1
1.2 Motivação 1
1.3 Objetivos 2
1.4 Metodologia 3
1.5 Organização da dissertação 4
2. ESTADO DE ARTE 7
2.1 Manufatura Aditiva 7
2.2 Estruturas Biomiméticas 14
2.3 Impressão Multimaterial 17
3. Metodologia para seleção de pares de materiais 23
3.1 Relevância 23
3.2 Proposta do Método 23
3.3 Abordagem de Validação 31
3.3.1 Estratégia 31
3.3.2 Materiais 33
3.3.3 Produção dos provetes 34
3.3.4 Caracterização 44
3.4 Resultados dos Ensaios de Tração 45
4. Impressão 3D de estruturas híbridas 58
4.1 Resolução do Equipamento 58
4.2 Impressão das Estruturas Híbridas 64
4.3 Ensaios Mecânicos 74
4.4 Análise Global 77
5. Conclusão 79

5.1 Sugestão para trabalhos futuros 80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organograma do trabalho desenvolvido 6
Figura 2. 4 pilares da manufatura aditiva: Materiais, Metrologia, Mercado, Produção [11]. 8
Figura 3. Esquema de um extrusor usado no processo de impressão 3D FFF. 11
Figura 4. Esquema de impressão de uma peça com material de suporte. 12
Figura 5. a) Princípio de deposição de camadas; **b)** Ilustração da força de adesão entre camadas, nas diferentes direções [39]. 13
Figura 6. Exemplos de estruturas encontradas na natureza que suscitaram interesse pelas suas arquiteturas com caraterísticas estruturais excecionais [47]. 15
Figura 7. Funções de macro/micro e nanoestruturas nas suas organizações hierárquicas [53]. 17
Figura 8. Resistência vs rigidez de materiais de engenharia e materiais biológicos [41]. 18
Figura 9. Difusão intermolecular entre fibras durante o processo de impressão [63]. 19
Figura 10. Exemplo ilustrativo do impacto do aumento da altura de camada na diminuição da área de contacto entre camadas [67]. 20
Figura 11. A integração da manufatura aditiva e o biomimetismo prometem proporcionar avanços no desenvolvimento de tecnologia na área de engenharia nas próximas décadas [69]. 21
Figura 12. Diferentes métodos de montagem de subcomponentes [adaptado de 71]. 24
Figura 13. Etapas do processo de soldadura topo-a-topo [adaptado 72,73]. 25
Figura 14. Máquina de Soldadura Topo – a – Topo. 27
Figura 15. Peça maquinada no DONE Lab para posicionamento/junção de filamentos na máquina de soldadura 28
Figura 16. Identificação dos componentes da máquina de soldadura 29
Figura 17. Teste realizado com as soluções encontradas. 30
Figura 18. Ilustração do processo de soldadura do par PC – Filaflex. 30
Figura 19. Impressão 3D FFF utilizada 32
Figura 20. Esquema dos provetes usados nos ensaios mecânicos 33
Figura 21. Estrutura usada na determinação da temperatura de impressão e temperatura da cama de deposição (escala em mm). 37
Figura 22. Exemplo ilustrativo dos diferentes tipos de provetes impressos. 38
Figura 23. Caixa de acoplamento de filamentos para impressão 39
Figura 24. Representação das soluções encontradas para melhoria de adesão dos materiais. a) revestimento da mesa com PEI para o Policarbonato; b) fita-cola embebida com cola para impressão do Nylon. 40
Figura 25. Equipamento utilizado no ensaio de tração 45
Figura 26. Força máxima de filamentos e filamentos soldados consigo próprios. 46
Figura 27. Resistência dos filamentos soldados e filamentos retirados da bobine. 47
Figura 28. Módulo de Young de filamentos e filamentos soldados consigo próprios. 48
Figura 29. Força máxima de filamentos soldados e pares de materiais diferentes soldados. 49

Figura 30. Comparação do módulo de Young entre filamento soldado e pares de materiais soldados.....50
Figura 31. Força Máxima dos pares híbridos obtidos por impressão 3D 51
Figura 32. Tensão de rutura dos diferentes pares híbridos obtidos pelos processos de soldadura e de impressão 3D.52
Figura 33. Representação dos quatro diferentes provetes obtidos com o TPU – NinjaFlex. 53
Figura 34. Tensão de rutura dos quatro tipos de provetes de NinjaFlex, obtidos pelos processos de soldadura e de impressão. 54
Figura 35. Curvas tensão-deformação dos quatro tipos de provetes de Nylon obtidos pelos processos de soldadura e de impressão. 55
Figura 36. Tensão de rutura dos quatro tipos provetes de Nylon, obtidos pelos processos de soldadura e de impressão. 56
Figura 37. Curvas tensão-deformação dos cinco corpos de prova híbridos, obtidos através dos processos de soldadura e de impressão 3D.....57
Figura 38. Estrutura hierárquica do Nacre [81]. 58
Figura 39. Componente usado para determinar resolução de impressão do equipamento: **a)** desenho 2D da estrutura idealizada (medidas em milímetros); **b)** respetivo desenho 3D. 59
Figura 40. Teste de resolução de impressão: **a)** peça importada para o ambiente trabalho do Simplify3D; **b)** peça ampliada, onde A corresponde ao quadrado de 20x20 mm impresso pelo extrusor 1 e B representa estrutura impressa pelo extrusor 2.....60
Figura 41. Amostras obtidas no processo de resolução com nozzle de 0,4 mm.....63
Figura 42. Amostra obtida no processo de resolução com o nozzle de 0,25 mm de diâmetro. 63
Figura 43. Tentativa número 1 de posicionamento da peça na mesa de impressão. 64
Figura 44. Tentativa número 2 de posicionamento da peça na mesa de impressão. 65
Figura 45. Tentativa número 3 de posicionamento da peça na mesa de impressão. 65
Figura 46. Esquema de impressão "Peça teste". 66
Figura 47. Estrutura bioinspirada: **a)** peça com padrão replicado (Simplify3D); **b)** peça impressa com o método bi-material com um nozzle de 0,25 mm. 67
Figura 48. Vista parcial da estrutura obtida através da lupa do microscópio. 67
Figura 49. Medições realizadas às secções da peça impressa. 68
Figura 50. Peça com suporte para promover o aumento da área de contacto com a mesa. 71
Figura 51. **a)** fita de papel colada na mesa de impressão onde posteriormente é colocada cola líquida; **b)** primeiras camadas a serem impressas sobre a fita de papel. 71
Figura 52. **a)** primeiras camadas impressas do provete híbrido; **b)** provete em estado avançado de impressão reforçado com fita-cola de papel nos suportes existentes nas suas extremidades. 72
Figura 53. **a)** processo de impressão de um provete de Nylon; **b)** provete de Nylon impresso.....72
Figura 54. Provetes híbridos e Nylon impressos. 73
Figura 55. Provetes impressos vistos de cima. 73
Figura 56. Equipamento utilizado nos ensaios de flexão.....75
Figura 57. Equipamento utilizado nos ensaios de Impacto. 76

FIGURA 58. A) ENSAIOS REALIZADOS À VELOCIDADE DE 3MM/S; **B)** ENSAIOS REALIZADOS À VELOCIDADE DE 600MM/MIN..... 77
FIGURA 59. ENSAIO DE IMPACTO DE UM PROVETE HÍBRIDO. 78

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. PARÂMETROS CHAVE DO PROCESSO DE SOLDADURA TOPO-A-TOPO [ADAPTADO DE 71]..... 26
TABELA 2. CONDIÇÕES DE ENSAIO DOS PROVETES DE SOLDADURA TOPO-A-TOPO. 35
TABELA 3.RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDADURA TOPO-A-TOPO..... 36
TABELA 4.TEMPERATURAS DE IMPRESSÃO USADAS NOS MATERIAIS..... 37
TABELA 5. PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PROVETES TIPO A E B. 41
TABELA 6. PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PROVETES TIPO A-A E B-B..... 42
TABELA 7. PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PROVETES TIPO A-B. 43
TABELA 8. PARÂMETROS USADOS NO ENSAIO DE TRAÇÃO..... 45
TABELA 9. CONDIÇÕES TESTADAS NA RESOLUÇÃO DE IMPRESSÃO, COM NOZZLE 0,4 MM E 0,25 MM..... 60
TABELA 10. CONDIÇÕES DE IMPRESSÃO DOS PROVETES HÍBRIDOS (NYLON/NINJAFLEX) E PROVETES DE NYLON. 69
TABELA 11. PARÂMETROS USADOS NO ENSAIO DE FLEXÃO..... 75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ABS	*Acrylonitrile butadiene styrene*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CAD	*Computer Aided Design*
FFF	*Fused Filament Fabrication*
HIPS	*High Impact Polystyrene*
ISO	*International Organization for Standardization*
MA	Manufatura Aditiva
Nylon	Poliamida
PC	*Polycarbonate*
PE	*Polyethylene*
PEI	*Polyethylenimine*
PLA	Poli (ácido láctico)
PLC	*Programmable Logic Controller*
PTFE	*Poly(tetrafluoroethene)*
PVC	*Poly(vinyl chloride)*
Tf	Temperatura de Fusão
Tg	Temperatura de Transição Vítrea
TPE	Elastómero termoplástico
TPU	Elastómero termoplástico de poliuretano
TPC	Elastómero Termoplástico de Co-poliéster

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A impressão 3D é hoje em dia uma tecnologia de produção aditiva de elevado impacto. Das várias tecnologias de impressão, a de fabrico com filamento fundido (FFF) é certamente hoje aquela que apresenta uma maior expressividade. Isto resulta não só da facilidade em aceder a tais equipamentos como também do ritmo elevado de evolução da técnica, tanto a nível de equipamentos, mas também a nível de materiais disponíveis.

Com a possibilidade de imprimir com filamentos compósitos, nomeadamente filamentos de base polimérica com cargas funcionais, dispomos agora de uma nova possibilidade de fabrico de estruturas técnicas. Se uma das principais vantagens do fabrico por impressão 3D é a quase total liberdade geométrica dos componentes que se podem produzir, ao aliarmos a possibilidade de imprimir filamentos compósitos, temos como resultado a possibilidade de construir peças compósitas com geometrias impossíveis de obter com as técnicas convencionais. Se aliarmos a este fator a possibilidade de imprimir peças multimaterial com auxílio de impressoras com múltiplos extrusores (e, portanto, peças compostas por vários filamentos distintos), então abrimos a oportunidade para produzir peças compósitas híbridas e estruturadas.

1.2 Motivação

Embora seja possível encontrar na natureza novos modelos de estruturas capazes de melhorar o desempenho dos materiais, as suas características hierárquicas vão muito além da capacidade dos métodos convencionais de manufatura. Apesar de existirem na natureza esses inúmeros exemplos, quer a sua disponibilidade limitada, quer a dificuldade inerente em obter muitos desses materiais em grandes quantidades, dificultam o seu uso em aplicações de engenharia. Dessa feita, é importante conseguir encontrar alternativas capazes de projetar e produzir materiais e estruturas compósitas que consigam ter funções semelhantes à dos materiais encontrados na própria natureza [1]. Os materiais e estruturas compósitas são cada vez mais importantes porque são económicos e podem potencialmente combinar propriedades

incomuns que não são encontradas em metais, polímeros ou cerâmicos de forma individual. Não desvalorizando a sua relevância, os compósitos atuais reforçados com fibras ainda exibem numerosas deficiências, nomeadamente a baixa resistência ao impacto. Impulsionado pelo facto de muitas estruturas biológicas serem materiais compósitos que exercem uma função mecânica, uma abordagem bioinspirada tem sido particularmente atraente para a criação de novos compósitos sintéticos. A capacidade de combinar componentes flexíveis e rígidos é uma estratégia adotada pelos organismos vivos, expostos à seleção natural ao longo de milhões de anos, para otimizar estruturas com excelente comportamento mecânico [2].

Desta feita surge a importância do desenvolvimento de técnicas de impressão 3D, pois fruto do seu método de construção, camada-a-camada, advém a sua liberdade sem precedentes no fabrico de estruturas complexas, compósitas e híbridas, com precisão e um controle que não podem ser feitos através dos métodos tradicionais de produção [3][4]. A união entre os dois mundos permitirá produzir materiais e estruturas que serão capazes de serem otimizadas para uma dada função e em várias escalas de dimensão [1].

A presente dissertação pretende resolver duas questões extremamente importantes na produção de estruturas híbridas complexas: método que permita selecionar materiais rígidos e flexíveis compatíveis que possam funcionar como pares híbridos nessas estruturas e estudar a capacidade de resolução de equipamentos por forma a poder tentar mimetizar estruturas híbridas.

1.3 Objetivos

A dissertação tem como principal objetivo avaliar o potencial do processo de impressão FFF multi-material, para a produção de estruturas técnicas híbridas, que poderão ou não ser incorporadas em laminados compósitos.

De modo a poder avaliar essas estruturas técnicas será necessário:

I. Idealizar um teste expedito que permita testar a possível compatibilidade entre materiais e avaliar o potencial da impressão FFF multimaterial;
II. Selecionar os possíveis pares de materiais que apresentem as melhores características que se coadunam com o propósito do trabalho;
III. definir os seus requisitos (dimensionais, geométricos, funcionais);
IV. identificar e selecionar possíveis geometrias e materiais;

V. produzir as estruturas técnicas mais promissoras;

VI. caracterização das amostras.

Por fim, será feita a caracterização e avaliação do seu desempenho tendo em vista o propósito do seu desenvolvimento/ produção.

1.4 Metodologia

O ponto de partida na realização da dissertação, consistiu numa pesquisa bibliográfica tendo como foco a impressão 3D, mais em concreto a de filamento fundido, e na possibilidade de utilizar materiais compósitos na impressão de estruturas híbridas, usando esta tecnologia.

Esta pesquisa, envolta numa componente científica, tem como intuito servir como base de apoio a toda a temática abordada ao longo da dissertação.

Numa segunda fase, foram selecionados filamentos de dois tipos de materiais: materiais rígidos (Policarbonato, Nylon (Poliamida) e o G6-Impact (HIPS – poliestireno de alto impacto)) e materiais flexíveis (NinjaFlex (TPU – poliuretano termoplástico), FilaFlex (TPE – elastómero termoplástico) e TPC 45 (TPU)).

Pelo facto de a dissertação ter como ponto primordial a impressão de uma estrutura híbrida composta por um material rígido e um material flexível, tornou-se imperativo desenvolver um método que fosse expedito, capaz de aferir uma possível compatibilidade química entre os materiais e ao mesmo tempo capaz de simular os efeitos de soldadura ocorridos no processo de impressão 3D.

A técnica de soldadura topo-a-topo foi a solução equacionada, onde foram cortados uma série de filamentos e testada a sua soldadura, quer em provetes em que um material se soldou consigo próprio quer em provetes híbridos em que o material se soldou com outros.

Neste processo foram encontradas diversas dificuldades tendo em conta que o equipamento utilizado, um protótipo concebido para soldar provetes de injeção, provetes estes com dimensões (área de secção transversal) bastante superiores aos filamentos testados. As diversas dificuldades demonstraram-se desde do posicionamento dos filamentos no equipamento, à fase de aquecimento e à garantia de que as amostras estariam devidamente alinhadas aquando da sua junção. Reunidos os pares obtidos, as amostras produzidos foram submetidos a testes mecânicos onde foram tidos em conta a força máxima e o módulo de Young.

Com a seleção de pares de materiais feita através da técnica de soldadura, foi dado o mote para o passo seguinte: a repetição do mesmo processo usando a impressão 3D FFF e posterior análise e comparação com os dados obtidos em ambos os processos. Sendo um processo diferente naturalmente surgiram novos desafios e dificuldades à medida do desenlace do processo. Tratando-se de uma impressão bi-material o ponto primordial foi garantir que os dois extrusores se encontravam devidamente alinhados aquando da impressão, condição essencial para que as interfaces de cada material coincidam na perfeição e para que haja área de contacto entre as duas metades. Garantida a calibração dos extrusores, o passo seguinte foi a determinação das temperaturas de impressão de cada material, e a temperatura ideal para a mesa de impressão, de modo a favorecer a adesão à mesma.

Terminado o processo acima citado foi dado o início às impressões 3D visando repetir os mesmos pares de materiais obtidos pela técnica de soldadura topo-a-topo. Concluídas as impressões foram realizados igualmente os ensaios mecânicos para termo de comparação com os feitos anteriormente.

Após a conclusão do estudo da compatibilidade entre os pares de materiais e selecionado o par ideal, foram feitos os desenhos 3D das estruturas híbridas a serem impressas, foi feito um estudo do poder de resolução da impressora, culminando todo o processo com a impressão dos provetes e respetivos ensaios mecânicos.

1.5 Organização da dissertação

A dissertação está estruturada e dividida em cinco capítulos distintos. O primeiro e presente capítulo desempenha um papel introdutório à temática abordada, onde nele assentam o enquadramento da temática, a devida motivação que instigou a realização da dissertação, os objetivos a cumprir no seu desenrolar, a metodologia idealizada e aplicada e, por fim, a respetiva organização da dissertação.

No segundo capítulo, intitulado Estado de Arte, é feito um levantamento técnico-científico com o propósito de sustentar, de uma forma clara, credível e rigorosa, todo trabalho realizado ao longo da dissertação.

Posteriormente, no terceiro capítulo – Metodologia para a seleção de pares de materiais – é feita uma proposta de abordagem do método de seleção, a sua posterior abordagem de validação e os resultados obtidos na conclusão do estudo.

O quarto capítulo – Impressão 3D de Estruturas Híbridas – é composto por um estudo da resolução de impressão do equipamento, a respetiva impressão das estruturas, culminando com os respetivos ensaios mecânicos e discussão dos resultados.

Por último, o capítulo cinco – Conclusão – onde, com o culminar de todo um trabalho, são retiradas as devidas conclusões após a realização da dissertação.

O trabalho realizado é esquematicamente resumido na Figura 1.

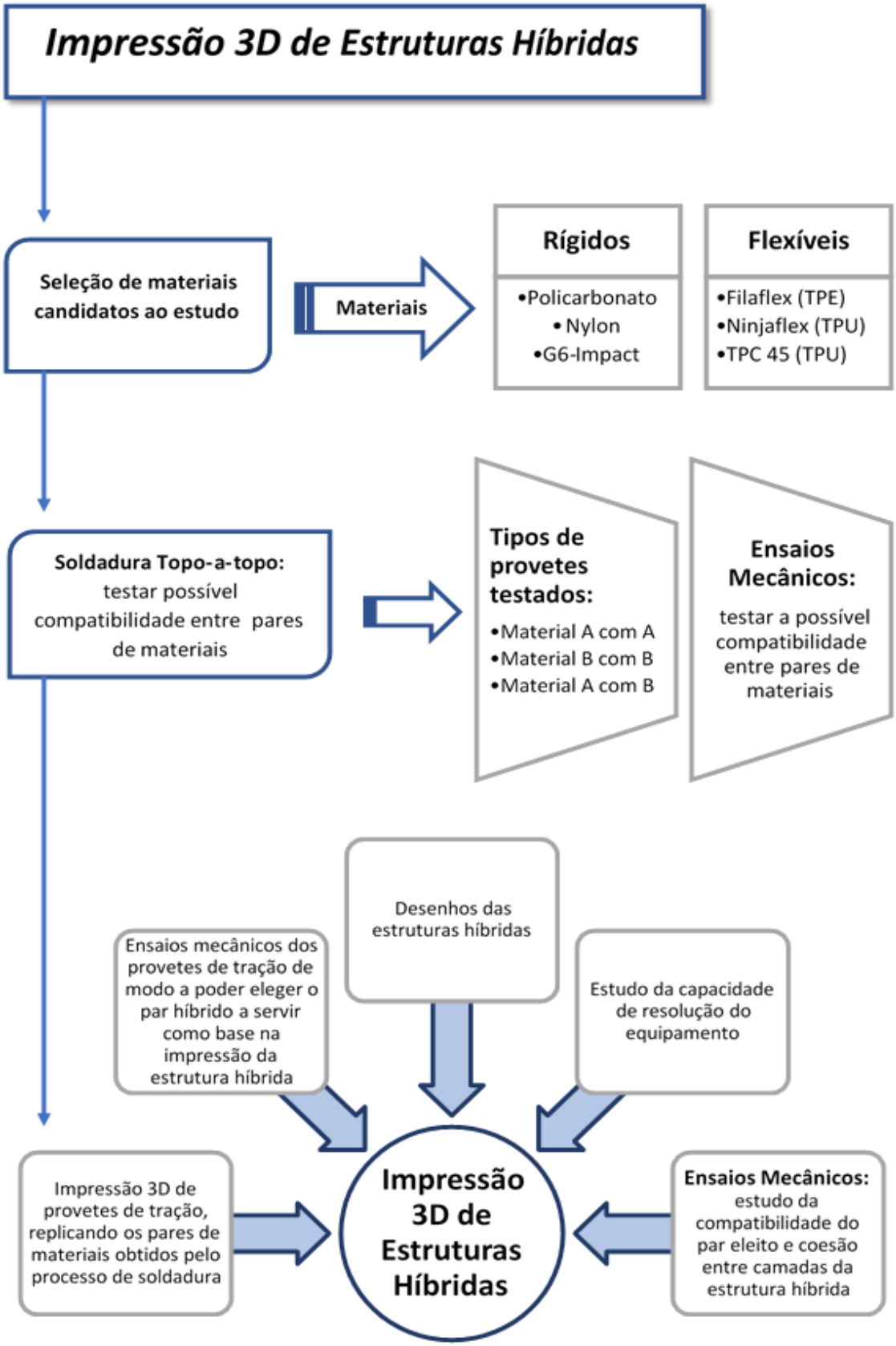

Figura 1. Organograma do trabalho desenvolvido.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA), frequentemente referida como impressão 3D ou prototipagem rápida, é definida pela *International Organization for Standardization* (ISO) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como o "processo de união de materiais que permite criar peças a partir de modelos 3D, geralmente camada-a-camada, ao contrário de metodologias de manufatura subtrativas e de moldação" [4]. A impressão 3D engloba três conceitos que lhe são essenciais como ideia revolucionária: universal, prática e eficiente. Considerando o quão "universal" a impressão 3D é e as áreas que a mesma já influenciou, o seu impacto é bastante notável [5]. A mesma, é capaz de produzir objetos tridimensionais reais (3D) com uma infinita liberdade de *design*, usando uma grande variedade de materiais, tais como metais, cerâmicos ou plásticos, que podem ser usados em diversas aplicações [6][7]. Fruto do seu método de construção, camada-a-camada, proporciona uma liberdade sem precedentes no fabrico de estruturas complexas, compósitas e híbridas, com precisão e um controle que não podem ser feitos através dos meios tradicionais [3][4].

Para alem do uso tradicional como uma ferramenta de prototipagem rápida ou produção em pequena escala de itens personalizados, a MA tem sido explorada num leque alargado de áreas, desde a arquitetura, medicina, engenharia e antropologia [8][9]. O seu sucesso assenta no quão bem o objeto produzido serve o seu propósito na sua aplicação alvo. A sua adoção por parte da indústria, ditar-se-á pela sua capacidade em criar e transformar formas e estruturas em objetos úteis, da certeza com que será possível assegurar que as propriedades dos materiais, quando transformados nessas estruturas, serão capazes de cumprir com os padrões normalizados [10], enquanto o custo de produção permanecer competitivo. Poder-se-á dizer, por outras palavras, que a aceitação por parte dos mercados de produtos produzidos por MA, acontecerá quando as peças produzidas corresponderem às propriedades pretendidas pelos meios de medição e metrologia apropriados [11]. Na Figura 2, é possível observar os quatro pilares essenciais na adoção da MA como um meio de produção de qualquer tipo de objetos.

Alguns dos potenciais benefícios da manufatura aditiva são [12][13]:

- O rápido transitar desde a ideia de *design* para o componente final;
- Produção de peças com elevado grau de personalização sem custo adicional de ferramentas ou fabrico;

- *Design* funcional permitindo a conceção de características internas complexas;
- Fabrico de componentes flexíveis e leves com cavidades;
- Capacidade de fabrico de componentes até à sua forma final ou perto da mesma, com um mínimo ou mesmo nenhuns processos adicionais;
- Potencial de produção de quase zero desperdício, através da maximização da utilização dos materiais;
- Uma redução no desenvolvimento geral do produto e no seu tempo de produção, tornando o produto acessível, num período mais curto;
- Menor pegada operacional para fabricar uma grande variedade de peças;
- Produção sob encomenda e excelente escalabilidade.

Figura 2. 4 pilares da manufatura aditiva: Materiais, Metrologia, Mercado, Produção [11].

É tida como essencial uma evolução por parte dos materiais e da metrologia, para além do seu estado atual, para tornar a MA num processo de fabrico industrial genuíno. Dada a sua versatilidade, flexibilidade e o seu caracter altamente personalizável, esta é uma tecnologia altamente adequada para a maioria dos sectores de produção industrial [14]. A MA é capaz de produzir peças altamente funcionais num alargado leque de materiais, incluindo metais, cerâmicos, polímeros e combinações dos mesmos na forma de compósitos e híbridos. Os polímeros, como parte desse leque de materiais, têm sido amplamente utilizados talvez devido à sua utilização nas máquinas de 1ª geração, projetadas principalmente para a prototipagem rápida [15][16]. Os principais desafios do processo de fabrico por MA assentam no desenvolvimento de um sistema integrado, robusto, fácil de usar, seguro e integrado que forneça

movimento e velocidade ao sistema de impressão, e um elevado poder de resolução aliado a controlo dimensional. Para além desses, os acabamentos superficiais, os tamanhos das peças, as variações na qualidade do produto de máquina para máquina e entre lotes de produção, e uma falta de compreensão do impacto das variáveis de operação na qualidade das peças são também desafios a serem ultrapassados [17].

Nos processos de MA são usados frequentemente materiais poliméricos devido às temperaturas de fusão relativamente baixas, à sua excelente capacidade de fluir quando fundido ou amolecido e à sua estabilidade química. Motivado pela necessidade de produção de peças que apresentem excelente estabilidade mecânica, dimensional e química a altas temperaturas e pressões, mesmo após a exposição a condições adversas, tem ocorrido um direcionamento para o uso de polímeros de elevado desempenho nos processos de MA. Em caso de uso de polímeros convencionais, o seu desempenho pode ser melhorado com a adição de cargas especiais, como, por exemplo, o grafeno e nanotubos de carbono [11].

Nas últimas três décadas, várias tecnologias de MA foram desenvolvidas para serem usadas em diferentes aplicações e com diferentes materiais [1], mas todos os processos podem ser resumidos da seguinte forma [7][18]:

1. Inicialmente é gerado um determinado conceito de *design* a partir do zero ou através do uso de *scanners* 3D, tomografia computadorizada (TC), ou ressonância magnética (MRI), no caso de implantes médicos;
2. É realizado um desenho 3D auxiliado por computador (CAD);
3. O modelo CAD é analisado e otimizado com o auxílio de técnicas de otimização computacional, como a análise de elementos finitos;
4. O modelo CAD é geralmente transformado num ficheiro formato STL e importado para uma impressora 3D;
5. A forma geométrica, quer o ficheiro seja em formato STL ou de outro tipo, é cortada em camadas finas e a cabeça de impressão, a própria mesa onde a forma geométrica é impressa, bem como outros parâmetros são programados por um software especializado que prepara o *G-code*, sendo esta uma linguagem de programação de controlo numérico;
6. A impressora 3D constrói o objeto tridimensional camada a camada com os parâmetros previamente especificados;
7. A peça construída é removida da mesa de impressão e, no caso de esta ser uma geometria complexa, todo o material usado na sua estrutura de suporte, carece de ser removido restando unicamente a geometria final;

8. Depois de a peça ser removida e limpa, poderá ser necessário pós-processamento adicional, traduzindo-se o mesmo em polimento, revestimento ou tratamento térmico, para obter uma peça funcional.

Os processos de MA baseados no método de extrusão estão entre os processos mais amplamente utilizados, particularmente quando se usam polímeros e compósitos termoplásticos [6]. Os polímeros apresentam temperaturas de transição vítrea e fusão relativamente baixas, de tal modo que facilitam o fluxo de material a temperaturas mais baixas que as correspondentes a materiais cerâmicos ou metais [19], permitindo o seu uso em impressoras disponíveis comercialmente e sem comprometer a resistência final das peças, que podem ser utilizadas em aplicações com um amplo alcance [20].

Comparado com outros processos de MA, a impressão 3D de filamentos fundidos é a técnica mais utilizada pelo facto de o processo ser seguro e simples (não requer pós, lasers, solventes nem compostos voláteis), pelo baixo custo do equipamento e pelo alargado leque de filamentos atualmente existentes para impressão [1][21]. O leque de filamentos estende-se desde o ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno) e o PLA (Poliácido láctico), como os mais utilizados, ao HIPS, TPU, PA (Poliamida), entre outros [22].

Na sua maioria, visível nas Figuras 3 e 4, os equipamentos de impressão baseados no método de extrusão estão equipados com uma cabeça de extrusão, ou extrusor; não obstante, existe a possibilidade de acrescentar duas ou mais cabeças abrindo a hipótese de realizar impressões multi-material [1][6]. O método de impressão 3D FFF, requer a inserção de um filamento no interior de uma cabeça de extrusão; à posteriori, esse filamento é fundido dentro de um bloco de metal aquecido [23] e, por meio de aplicação de uma força ou pressão, é expelido através de um orifício (*nozzle*) percorrendo uma trajetória pré-definida e controlada, construindo camada-a-camada a estrutura pretendida [1].

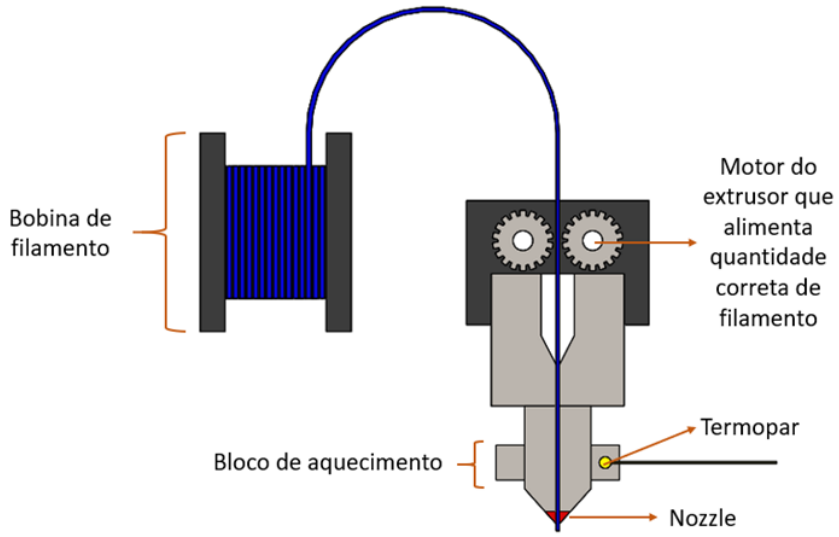

Figura 3. Esquema de um extrusor usado no processo de impressão 3D FFF.

Após completar cada camada, a mesa de impressão baixar-se-á, ou dependendo do equipamento, a cabeça de extrusão mover-se-á em sentido ascendente, adicionando uma nova camada à anterior. Por exigência de possíveis complexidades geométricas, poderá ser também necessário a impressão de uma estrutura de suporte que permita suster a mesma [24]. No alargado leque de equipamentos disponíveis, apenas alguns dispõe de uma câmara fechada e uma mesa de impressão aquecida, sendo as mesmas mantidas a temperaturas abaixo do ponto de fusão, mas acima da temperatura ambiente, promovendo dessa feita uma melhor adesão da peça à mesa, bem como a redução de possíveis tensões residuais [1][21]. A ausência destas estruturas acessórias poderá não ser necessariamente um impedimento a boas impressões, motivado pela existência de materiais no mercado, que não requerem tais cuidados [25].

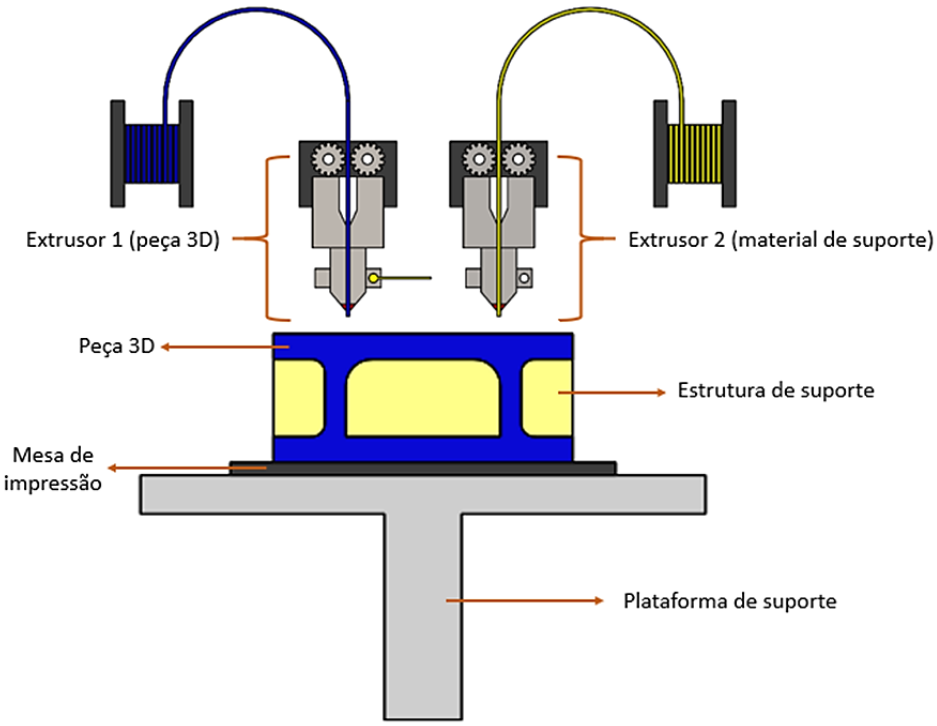

Figura 4. Esquema de impressão de uma peça com material de suporte.

Para que o sistema de alimentação, durante a impressão, funcione corretamente, os motores dos extrusores têm de gerar torque suficiente, e deverá existir atrito suficiente entre o filamento e as rodas dentadas do motor, para que estas consigam impelir o filamento a jusante. É, também importante que o próprio filamento seja suficientemente resistente de modo a evitar que se danifique devido ao aperto das rodas dentadas, e a força destas quando empurram o filamento, deve ser eficiente de modo a evitar encurvadura ou compressão do mesmo [1][26][27]. Um outro requisito, não menos importante, prende-se com o facto que este deverá ser suficientemente flexível de modo a facilitar o seu enrolamento, permitindo o seu fácil armazenamento de uma forma mais compacta e promovendo uma alimentação contínua do processo de impressão [27][28].

Tão importante como a escolha de um material adequado, uma escolha correta e cuidada dos parâmetros geométricos e das configurações adotadas para velocidades e temperaturas, em muitos casos, permitem obter melhores propriedades no produto final incluindo uma maior resistência, em comparação com produtos produzidos com máquinas muito mais caras [29]. A escolha correta das configurações pode demonstrar-se uma tarefa difícil devido ao número elevado de parâmetros que podem ser utilizados, acrescido pelo facto de os mesmos serem definidos antes de ser dado início à impressão e permanecerem inalterados até ao fim da mesma [30]. Em estudos anteriormente realizados, ficou demonstrado que a posição em que a peça é

impressa, a temperatura de impressão, espessura das camadas, a possível existência de vazios, a percentagem de enchimento, o ângulo de deposição das camadas, entre outros, têm um efeito substancial na qualidade e desempenho das peças impressas [29][31][32]. A simples orientação da peça na mesa de impressão tem impacto em aspetos como a qualidade da superfície, precisão geométrica, tempo de construção e custo de produção [33]. Fruto das caraterísticas do processo de deposição camada a camada, esquematizado na Figura 5, reside a principal desvantagem em substituir as técnicas de produção tradicionais pelo processo FFF, motivado pelo facto de as peças impressas não possuírem a mesma robustez, resistência ao impacto e consistência [34]. A principal razão deve-se principalmente à anisotropia das peças, ou seja, as propriedades variam em função da direção em que são medidas. Os filamentos são dispostos camada por camada, numa forma cruzada, e uma vez que o filamento é depositado o calor dissipa-se rapidamente, e no momento em que a próxima camada é depositada, a primeira camada já arrefeceu, dificultando a difusão molecular entre as mesmas [35]. Ao longo das diversas camadas, a resistência das peças é significativamente menor na direção Z do que no plano de deposição, X-Y, podendo ser uma ordem de grandeza inferior [29][36]. Devido a esta anisotropia, estudos comprovaram que esta pode reduzir a resistência ao impacto até 90% [37] e a resistência à tração até 85% [38].

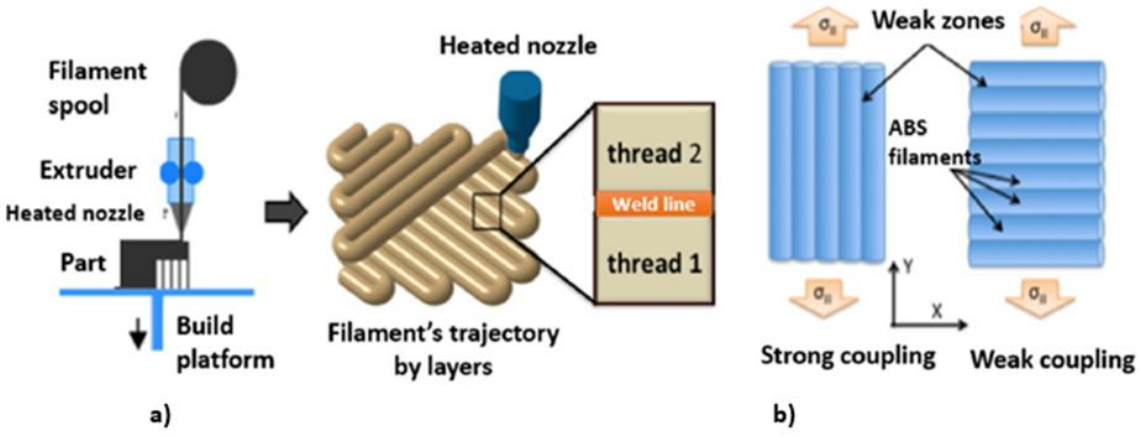

Figura 5. a) Princípio de deposição de camadas; **b)** Ilustração da força de adesão entre camadas, nas diferentes direções [39].

2.2 Estruturas Biomiméticas

O surgimento da impressão 3D trouxe consigo uma particularidade extremamente interessante, que só mais recentemente começou a ser explorada: manipular e imitar estruturas multi-escala, multimateriais e multifuncionais encontradas na natureza que não são acessíveis por outras tecnologias - biomimetismo [40][41]. O termo biomimetismo tem origem nas palavras “bios” (vida) e “mimesis” (imitar), esta é uma tecnologia que usa ou imita a natureza por forma a poder melhorar a vida humana. O biomimetismo é centrado na ideia de que não existe melhor modelo do que a natureza para desenvolver algo novo [42]. A metodologia subjacente ao biomimetismo é obter uma compreensão dos princípios fundamentais de um processo biológico ou adaptação e, posteriormente, adaptar esses conceitos para aplicações em produtos bioinspirados ou para resolver desafios técnicos específicos [43]. O despontar do interesse em explorar esse recurso foi impulsionado e inspirado nas complexas arquiteturas dos materiais biológicos, produzidos pelos organismos vivos na natureza. Estes, por terem sido altamente otimizados, através de centenas de milhões de anos de evolução natural, exibem arquiteturas naturais com características estruturais que não se encontram nos materiais concebidos pelo homem [2][44]. A chave do sucesso para as suas excelentes propriedades, visível na Figura 6, reside nas suas estruturas hierárquicas complexas que combinam componentes rígidos e flexíveis, e dependendo da geometria e das propriedades dos constituintes, as propriedades dos materiais naturais podem variar numa ampla gama [45][46].

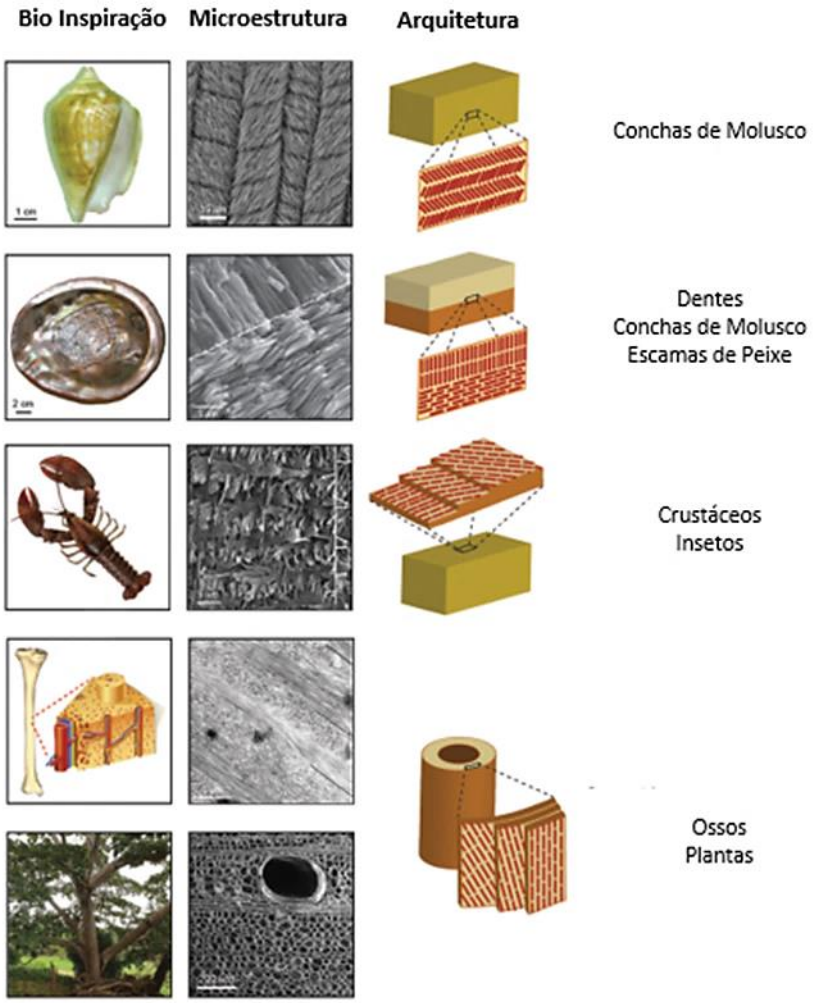

Figura 6. Exemplos de estruturas encontradas na natureza que suscitaram interesse pelas suas arquiteturas com caraterísticas estruturais excecionais [47].

A utilização de ferramentas de MA visando alcançar a replicação de algumas dessas estruturas com extraordinárias arquiteturas heterogéneas poderá abrir caminho para a produção de materiais bioinspirados, que superem os materiais sintéticos dos dias de hoje ou que vão ao encontro de determinadas funções desejadas, usando recursos mais benéficos ao meio ambiente ou biologicamente compatíveis [2]. Tal potencial na replicação de estruturas de materiais biológicos em componentes sintéticos, reside na sua capacidade intrínseca de controlar espacialmente a microestrutura local e a sua composição química de baixo para cima, camada-a-camada. Não menos curioso, essa abordagem de construção camada-a-camada, assemelha-se à forma como os organismos vivos depositam sequencialmente a matéria na conceção de materiais biológicos na natureza [47]. Essa característica apresenta uma vantagem fundamental, pois permite acessibilidade a todo o volume da peça durante o processo de construção [48].

Com essa capacidade, a MA oferece a oportunidade única de incorporar componentes como circuitos, sensores, motores (etc) em espaços projetados à priori [41].

Em diversas áreas industriais, o processo de conceção e implementação de perfis com propriedades mecânicas específicas, recorrendo ao uso de um único material, não é uma tarefa fácil [49]. Exemplo disso é o caso da vulnerabilidade dos materiais duros e rígidos a cargas de alta velocidade, pela sua falta de ductilidade [50]. Por forma a poder ultrapassar tais limitações, investigadores desenvolveram estruturas compósitas multimaterial através do estudo dos biomateriais e imitação das suas estruturas hierárquicas complexas. Vários aspetos das estruturas compósitas, tais como padrões criados pela combinação de materiais, podem ser manipulados para melhorar propriedades mecânicas, incluindo rigidez, tenacidade, ductilidade e resistência ao impacto [51]. Assumindo um papel cada vez mais importante, os compósitos são materiais cada vez mais importantes pela sua capacidade em combinar propriedades incomuns que não são encontradas em metais, polímeros ou cerâmicos quando usados de forma independente. Nos dias de hoje, existe uma forte procura por novos paradigmas de design e desenvolvimento de materiais estruturais avançados de alto desempenho e de baixo custo com excelentes propriedades [52].

A aptidão de combinar componentes flexíveis e rígidos num material compósito, é uma estratégia adotada e usada pelos organismos vivos, com o intuito de construir estruturas com um excelente comportamento mecânico [2]. Os sistemas naturais exibem estruturas hierárquicas altamente organizadas desde a nanoescala à microescala, como é possível observar na Figura 7. No que diz respeito à microescala, esta geralmente tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas (por exemplo, estabilidade, força e flexibilidade); por outro lado, as nanoestruturas criam funcionalidades únicas, como a superhidrofobicidade, a cor estrutural, características antirreflexo, capacidade de filtração seletiva ou adesão direcional [53].

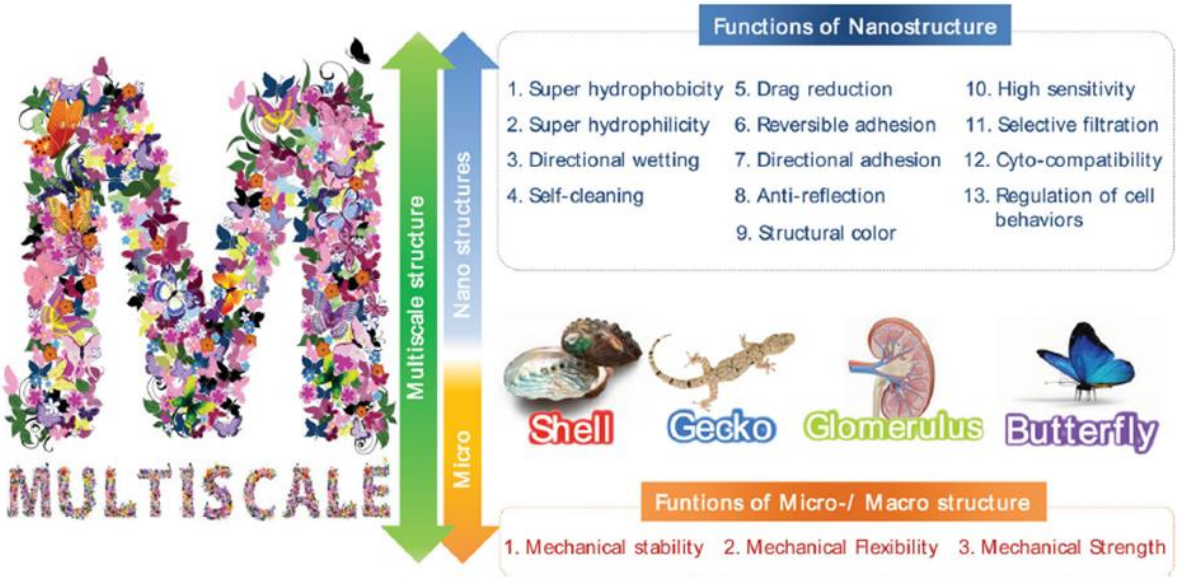

Figura 7. Funções de macro/micro e nanoestruturas nas suas organizações hierárquicas [53].

2.3 Impressão Multimaterial

De modo a ser possível imitar e produzir essas estruturas complexas, surgiu a impressão 3D multimaterial. O processo de impressão 3D recorrendo ao uso de polímeros, foi um dos primeiros processos que avançaram para a opção multimaterial devido à sua simplicidade e o seu baixo custo quando comparado com metais e cerâmicos [54]. A impressão multimaterial é uma tecnologia flexível que permite produzir estruturas híbridas bioinspiradas, alterando o desempenho das peças impressas ao adicionar-lhes uma maior complexidade e funcionalidade [55]. O seu potencial será um marco na manufatura rápida, no design personalizado e nas aplicações estruturais, podendo ser usado em aplicações de engenharia estrutural para obter o benefício das propriedades dos materiais combinados/ híbridos [56][57]. Os materiais poliméricos, utilizados no processo de MA, com resistência mecânica e durabilidade limitadas, incorporaram reforços, formando compósitos com melhor desempenho, nomeadamente propriedades térmicas, óticas e elétricas. Essencialmente, esses materiais compósitos foram criados para a indústria aeroespacial, automóvel, eólica, entre outras, que exigem materiais com um elevado desempenho mecânico [58]. Na Figura 8, pode ser observada a resistência e a rigidez, comparada entre materiais de engenharia e materiais biológicos.

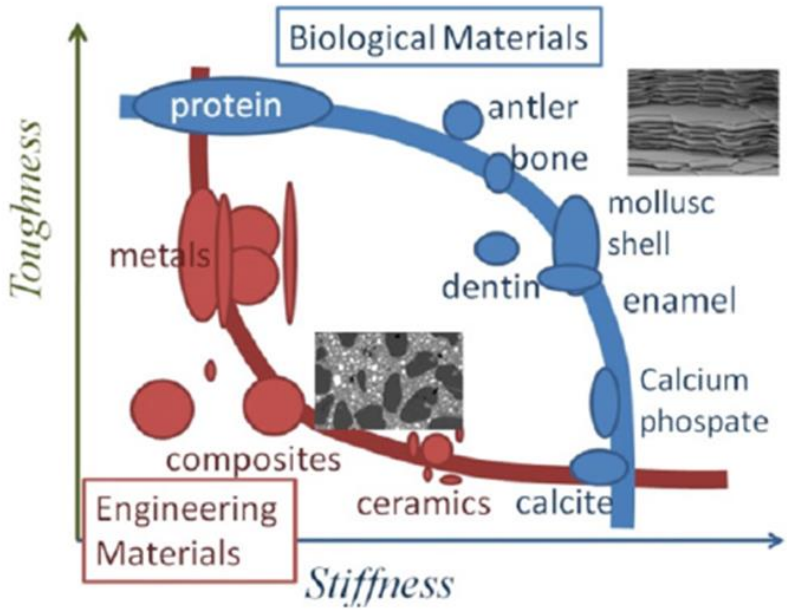

Figura 8. Resistência vs rigidez de materiais de engenharia e materiais biológicos [41].

Na mesma medida em que o processo de impressão 3D multimaterial apresenta um enorme avanço tecnológico, intrinsecamente a ele ligado estão uma série de fatores preponderantes a ter em conta. Imprimir dois materiais diferentes e, sobre eles criar um vínculo forte e duradouro, além de fatores de design como espessura do material e um bom projeto de junta, as diferenças na expansão e contração térmica, taxas de arrefecimento durante o processo de impressão e a própria aplicação da peça na vida real desempenham um papel importante na integridade da peça [54]. Nos dias de hoje, a maioria dos investigadores concentra-se principalmente na otimização dos parâmetros do processo de impressão e na inter-relação entre os diferentes parâmetros e os seus efeitos no produto final [59].

Nas peças obtidas pelo processo de impressão FFF, a união entre as diferentes camadas é tipicamente o ponto mais fraco em toda a estrutura [38], tornando-se claro que a adesão entre ambas desempenha um papel preponderante na determinação da resistência das peças impressas, em especial na direção Z [58]. Como tal, tornara-se imperativo colocar esforços no sentido de melhorar as ligações entre as camadas, e descobriu-se que parâmetros de impressão como a temperatura do *nozzle* e da cama de impressão, menor espessura das camadas e uma menor velocidade de impressão aumentam e favorecem a ligação entre as mesmas [60]. O processo de formação de ligações entre os filamentos é semelhante ao processo de soldadura de polímeros, onde a difusão molecular desempenha um importante papel. Estudos realizados indicaram que no processo de impressão 3D FFF, as propriedades na interface são inferiores às

dos materiais usados para produzir os filamentos. Inevitavelmente, é crucial a formação de ligações fortes para o desempenho estrutural das peças impressas. Inerente a essas ligações fortes está uma boa difusão molecular nas interfaces, promovendo o entrelaçamento das cadeias poliméricas, altamente dependentes de uma temperatura adequada [61]. Devido ao mecanismo de fusão-solidificação do processo FFF, as propriedades mecânicas das peças, são determinadas pelas ligações causadas pela temperatura entre as camadas impressas momentaneamente e as subjacentes. Tal processo resulta, num pequeno período de tempo, onde a interface polímero-polímero está acima da temperatura de transição vítrea (Tg), para materiais amorfos, ou temperatura de fusão (Tf) para materiais semicristalinos [62]. Desta feita, o perfil de temperatura da interface, durante o processo de impressão, é de extrema importância para a qualidade da adesão entre camadas e as propriedades mecânicas do produto final [63]. A adesão entre dois polímeros fundidos, visível na Figura 9, pode ser esquematicamente descrita em dois passos:

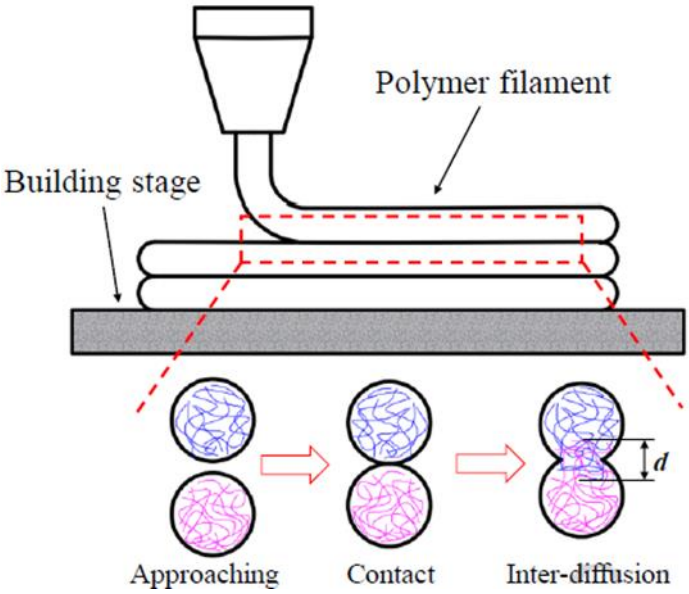

Figura 9. Difusão intermolecular entre fibras durante o processo de impressão [63].

Inicialmente existe uma aproximação das interfaces, dá-se um contacto superficial seguido pela difusão intermolecular de segmentos de cadeia polimérica através da interface fundida [64]. Quando dois polímeros contactam um com o outro, a sua área aumenta gradualmente e através desta, as cadeias poliméricas movem-se através da difusão intermolecular [63]. Uma boa soldadura entre filamentos depende da forma como o polímero fundido se difunde e mistura livremente na interface camada-camada [65]. Em estudos realizados sobre o impacto dos parâmetros de impressão na adesão entre camadas, verificou-se

que o aumento da temperatura de impressão, aliado a uma velocidade de impressão lenta e altura de camadas mais pequenas é bastante favorável à adesão entre camadas na direção Z (altura da peça). A velocidades mais baixas, o nozzle fornece calor local por radiação durante mais tempo, aumentando a difusão molecular nas interfaces, e aliado ao facto de diminuírem a altura das camadas, é necessário imprimir um maior número das mesmas criando mais oportunidades de as reaquecer, promovendo uma maior e melhor difusão na interface. Por outro lado, na direção XY (plano), os mesmos parâmetros traduziram-se numa menor resistência à tração. Após aumentar a altura das camadas, aumentou a área de contacto entre as camadas vizinhas, aumentando por sua vez a resistência à tração [66]. Em suma, não existe um conjunto universal de parâmetros de impressão, que permita gerar propriedades ótimas em todas as direções de peças impressas. Tal situação pode ser otimizada, sob uma cuidadosa escolha na forma como a peça é impressa, aliada a uma criteriosa escolha dos parâmetros de impressão. Ilustrado na Figura 10, é visível o impacto do aumento da altura de camada na diminuição da área de contacto entre ambas.

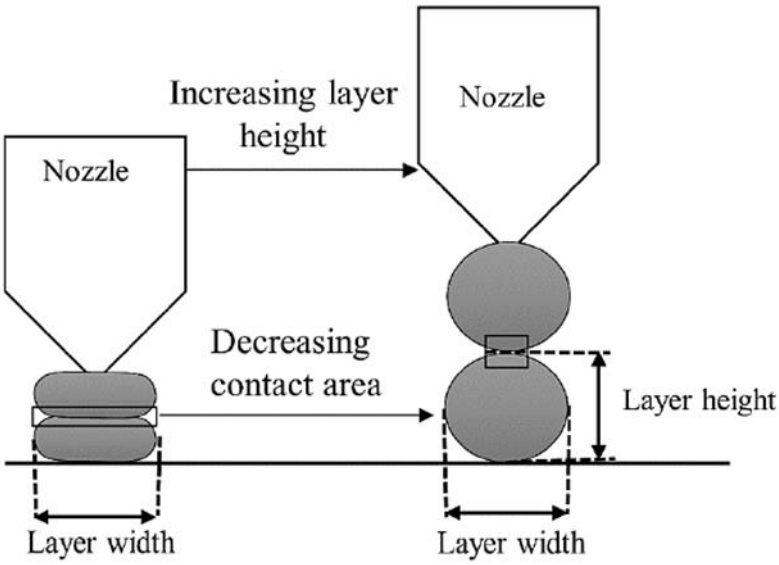

Figura 10. Exemplo ilustrativo do impacto do aumento da altura de camada na diminuição da área de contacto entre camadas [67].

A manufatura aditiva de materiais compósitos bioinspirados está a desempenhar um papel preponderante no processo evolutivo na área das ciências dos materiais pela sua capacidade em permitir um controlo microestrutural incomparável, estabelecendo um novo paradigma em design e produção de novos materiais funcionais [47][68]. Fruto do seu potencial na produção de novos dispositivos com materiais compósitos, têm sido realizados novos estudos sobre a manufatura aditiva de estruturas complexas com materiais que apresentam

propriedades únicas. Incentivada pela possibilidade de controlar com precisão as propriedades físicas, eletroquímicas, térmicas e óticas das estruturas complexas 3D, a própria indústria começa a fornecer materiais compósitos comerciais para aplicações especificas, e esta tendência continuará, sem sombra de dúvida. No entanto, ainda existem grandes desafios que precisam de ser superados de modo a ser possível tirar partido de todo o potencial da impressão 3D de materiais compósitos bioinspirados [47]. A Figura 11, ilustra a perfeita simbiose que se pode criar aliando os milhões de anos de evolução, por parte dos organismos da natureza, à manufatura aditiva.

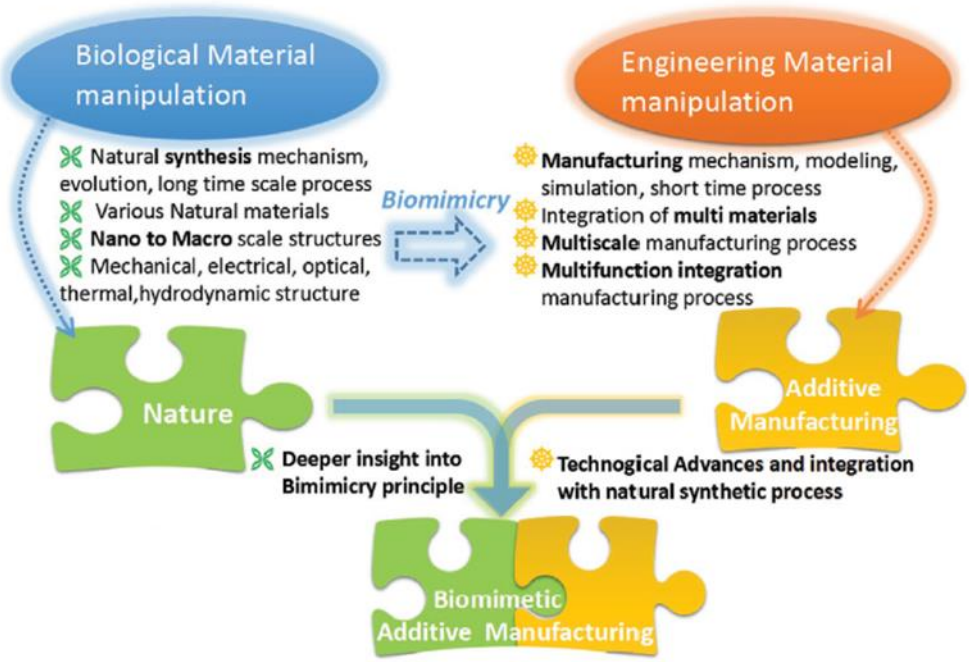

Figura 11. A integração da manufatura aditiva e o biomimetismo prometem proporcionar avanços no desenvolvimento de tecnologia na área de engenharia nas próximas décadas [69].

Futuros esforços de investigação poderão ser dedicados a:

- Desenvolver ferramentas de simulação que, em função das propriedades dos materiais, dos parâmetros de processamento e das estratégias de construção, sejam capazes de prever as propriedades das peças impressas. Tal avanço permitiria uma otimização do processo de impressão antes mesmo de este se iniciar [70].
- Torna-se imperativo ampliar a gama de materiais que podem ser impressos, bem como desenvolver novos compósitos. Os materiais atualmente usados são geralmente restritos a polímeros, cerâmicos e metais, ficando reféns das suas limitações, como baixa

resistência à tração e baixa resistência à temperatura. Ao contrário dos materiais sintéticos, os materiais estruturais da natureza formam híbridos de alto desempenho, com excelentes propriedades mecânicas, elétricas, entre outras [69].

- Melhoria das propriedades da interface de componentes multimaterial por forma a promover uma boa adesão entre os diferentes materiais e obter componentes multimaterial com uma longa vida útil [70].
- Desenvolver estratégias capazes de permitir implementar organizações hierárquicas nas peças impressas, de modo a ser possível usar as estruturas bioinspiradas em sistemas de engenharia. Será necessário um maior desenvolvimento na área da impressão 3D, juntamente com outras tecnologias, de modo a ser possível descobrir e entender os mecanismos que estão por de trás das propriedades e fenómenos que são observados na natureza [69].
- O *design* é o grande *input* do processo de impressão 3D e, como tal, desempenha um papel muito importante na engenharia inspirada na natureza. As criaturas encontradas na natureza apresentam uma alta complexidade geométrica, complexidade hierárquica e funcional, trazendo inúmeros desafios ao processo de design devido ao poder computacional limitado. Por outro lado, a natureza desenvolveu organismos em muitas escalas de comprimento e cada um deles define as propriedades únicas do organismo de uma forma sinérgica. Será necessário estabelecer um modelo de simulação multi-escala que permita decifrar e entender o mecanismo e a relação entre as estruturas e as propriedades [69].
- Todas as estruturas biológicas são multi-escala (nano a macro) e multifuncional (por exemplo, biológica, mecânica, ótica, elétrica), e embora as recentes tecnologias de impressão 3D lutem por reproduzir uma única função das estruturas da natureza, ainda estão muito além de o conseguir fazer de uma forma eficiente e atingir toda a sua complexidade. Será necessário, no futuro, desenvolver uma nova tecnologia de impressão 3D multi-escala, capaz de integrar diferentes processos de impressão 3D desenvolvidos para diferentes escalas de tamanho, a fim de ser capaz de produzir as estruturas bioinspiradas [69].

3. METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE PARES DE MATERIAIS

3.1 Relevância

A presente dissertação tem como propósito final a impressão 3D de uma estrutura híbrida, implicando dessa feita uma impressão bi-material, e como tal era perentório a realização de um estudo prévio que pudesse avaliar a compatibilidade entre os materiais candidatos, previamente selecionados.

Em virtude da semelhança entre o processo de soldadura topo-a-topo e a impressão 3D bi-material, aquando da junção de duas frentes de material fundido, este processo foi eleito para realizar esse estudo, pois permite de uma forma expedita estudar a hipotética compatibilidade entre os materiais, diretamente a partir dos seus filamentos, sem recorrer ao processo de impressão propriamente dito, que é relativamente moroso. No caso de estes resultados não serem bons indicadores, facilmente perceberemos que num processo como o de impressão 3D, em que o segundo material quando é impresso já o primeiro está quase ou praticamente arrefecido, as possibilidades de sucesso serão bastante diminutas, dada a premissa de que para existir uma boa soldadura terá de existir, não só mas também, uma boa difusão molecular na interface. Estando um dos materiais já praticamente arrefecido irá ter restrições no que toca a mobilidade molecular impossibilitando assim uma boa intrusão molecular e dessa feita será muito difícil existir soldadura entre ambos.

3.2 Proposta do Método

A existência de um equipamento de soldadura topo a topo, no Departamento de Engenharia de Polímeros (DEP), despoletou o método de estudo, dada a semelhança entre o processo de soldadura e a impressão 3D. A premissa será, após conhecimento das temperaturas de impressão de cada material (que constam nas respetivas fichas técnicas), recolher amostras de cada bobine e testar a soldabilidade entre pares do mesmo material e possíveis pares entre os diferentes materiais. Após soldadura, com os pares selecionados, serão realizados ensaios mecânicos com o intuito de poder avaliar a afinidade entre os diferentes materiais.

- **Soldadura Topo-a-topo**

Presentemente, e apesar de uma série de esforços realizados, existem uma série de produtos que dada a sua complexidade não podem ser fabricados numa só peça. Para suprimir essa dificuldade estes são divididos em subcomponentes, montados através de métodos que podem ser divididos em três grandes categorias: meios mecânicos, adesivos e soldadura (Fig.12).

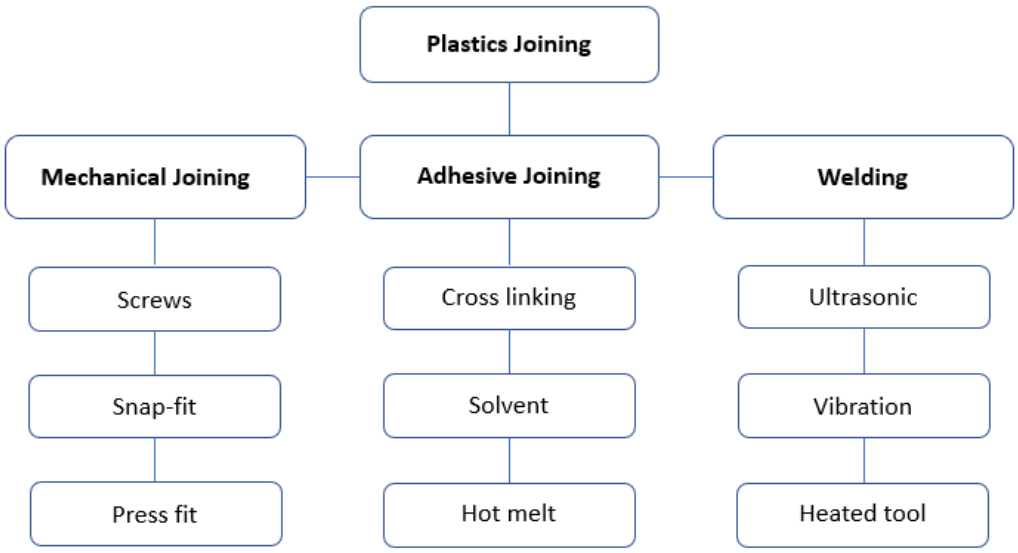

Figura 12. Diferentes métodos de montagem de subcomponentes [adaptado de 71].

A montagem recorrendo a meios mecânicos pode ser feita envolvendo o uso de parafusos metálicos ou poliméricos, rebites, ou mesmo através de encaixes rápidos moldados nas próprias peças. Por outro lado, quando se recorre ao uso de adesivos, estes são aplicados entre as partes, funcionando como um meio aderente entre si. A soldadura recorre ao uso de uma fonte de calor, ultrassons ou atrito, responsável por amolecer ou mesmo fundir o polímero na interface. As moléculas ganham então mobilidade, e através da aplicação de uma pressão é promovida a difusão molecular entre ambas as interfaces das peças, isto é, a sua soldadura.

A técnica de soldadura topo-a-topo de termoplásticos, caracteriza-se por ser uma técnica simples, tornando-a por isso fiável e bastante comum na indústria. Como tal, esta técnica, permite soldar componentes produzidos por extrusão de alguma complexidade e tamanho, componentes produzidos por injeção, entre outros métodos. O processo, representado na Figura 13, é iniciado ao colocar as duas superfícies em contacto direto com uma placa quente, através da aplicação de uma pressão, garantido assim que ao mesmo tempo que o material funde, as

irregularidades de ambas as superfícies se vão atenuando promovendo uma área de contacto mais uniforme aquando da sua junção [71][72][73]. Para evitar que material fundido fique "colado" à placa de aquecimento, estas são normalmente revestidas por um material antiaderente, o PTFE (politetrafluoretileno), usualmente conhecido por teflon [71]. Cumprido o tempo de aquecimento pré-estabelecido, as peças são afastadas da placa de aquecimento, após o que esta é removida. As duas frentes de material fundido são então juntas, formando uma barbela. Posteriormente dá-se o arrefecimento e forma-se uma zona de soldadura permanente [71][72][73]. Em certos equipamentos, a quantidade de material fundido e a fase de junção das superfícies é controlada por batentes mecânicos, delimitando assim a quantidade de material que flui para a barbela. No decorrer da fase de aquecimento, as duas metades são pressionadas contra a placa quente, o material funde e é pressionado até os batentes entrarem em contacto, momento em que deixa de ser exercida pressão [72]. Na tabela 1, são apresentados os parâmetros chave do processo de soldadura topo-a-topo.

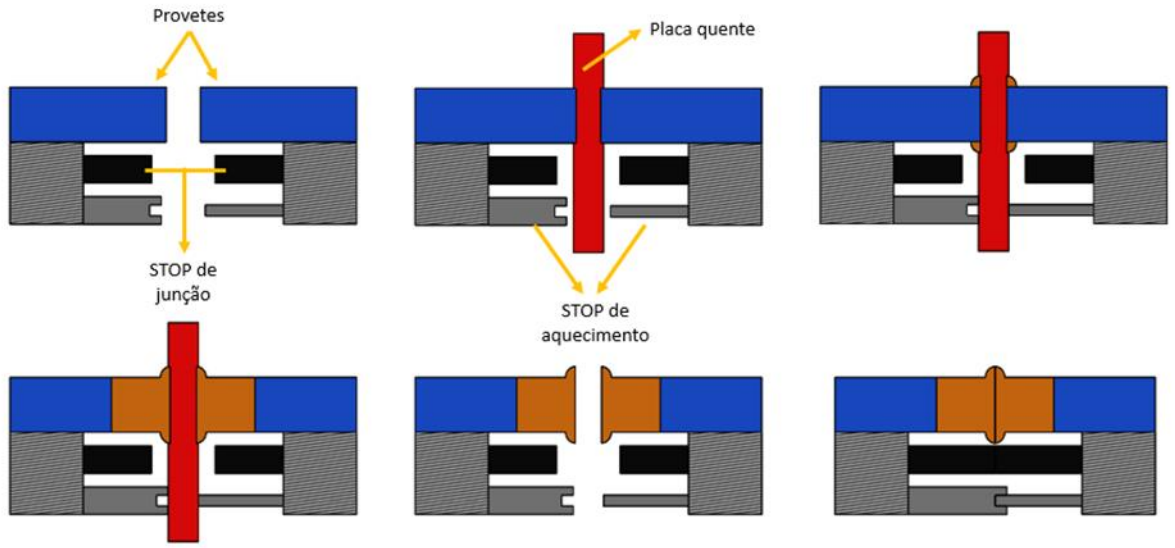

Figura 13. Etapas do processo de soldadura topo-a-topo [adaptado 72,73].

Tabela 1. Parâmetros chave do processo de soldadura topo-a-topo [adaptado de 71].

Variável do Processo	Descrição
Temperatura	Temperatura da placa quente
Tempo de aquecimento	Tempo de contacto das duas peças (superfícies) com a placa quente
Tempo de solda	Intervalo de tempo em que as peças são soldadas sob pressão
Força de junção	Força aplicada no contacto com a placa quente.
Deslocamento de fundido	Quantidade de material fundido (comprimentos)durante o aquecimento contra a placa quente, controlado por batentes mecânicos
Força de soldadura	Força aplicada durante a junção (soldadura) das peças
Deslocamento	Deslocamento durante a soldadura, controlado por batentes mecânicos
Tempo de arrefecimento	Tempo necessário para que as peças arrefeçam

Os tubos de PE (polietileno) para sistemas de drenagem e instalações de condutas de gás são uma das aplicações mais frequentes da soldadura topo-a-topo. Este processo é utilizado dada a facilidade de soldar o tubo no próprio local de colocação, permite um leque alargado de diâmetros e é um processo relativamente robusto. Como outras aplicações estão incluídos depósitos de combustível da indústria automóvel, graças a este ser um processo robusto que permite o ajuste de superfícies irregulares na fase de aquecimento e ser capaz de produzir soldaduras complicadas e fortes de forma consistente. Uma das suas principais limitações é o seu tempo de ciclo, tendo um tempo típico de 30 a 90 segundos, e com peças maiores poderá durar até 30 minutos [71].

O equipamento usado no estudo da presente dissertação, representado na Figura 14, é um protótipo desenvolvido no DEP, nos anos 80 com o propósito de estudar a soldadura de provetes normalizados de ensaios de tração, injetados. O equipamento é bastante simples, composto por uma placa de aquecimento, dois suportes onde são colocadas as amostras, um conjunto de batentes mecânicos que, descritos por Stokes [74], permitem controlar a quantidade

de material na fase de aquecimento, aquando da junção das duas superfícies e com que haja uma consistência no processo (eliminam oscilações) [73]. Face à dimensão dos provetes, foram escolhidos os batentes de menor dimensão, 0,5 mm. O PLC (*programmable logic controller*) permite definir os tempos de aquecimento e arrefecimento da soldadura, e o sistema de controlo de temperatura permite estipular a temperatura de cada ensaio. A placa de aquecimento e os suportes são movidos com ajuda de ar comprimido.

Figura 14. Máquina de Soldadura Topo – a – Topo.

Pelo facto de os filamentos terem 1,75 milímetros de diâmetro e o equipamento ter sido projetado para soldar peças com dimensões bastante superiores, foi necessário encontrar uma solução que permitisse o fácil posicionamento/junção dos filamentos nos suportes da máquina. Para o efeito, foi desenhado um pequeno componente, através do uso do software CAD SolidWorks, para acomodar o filamento, para posterior inserção nos suportes existentes na máquina de soldadura (Fig15).

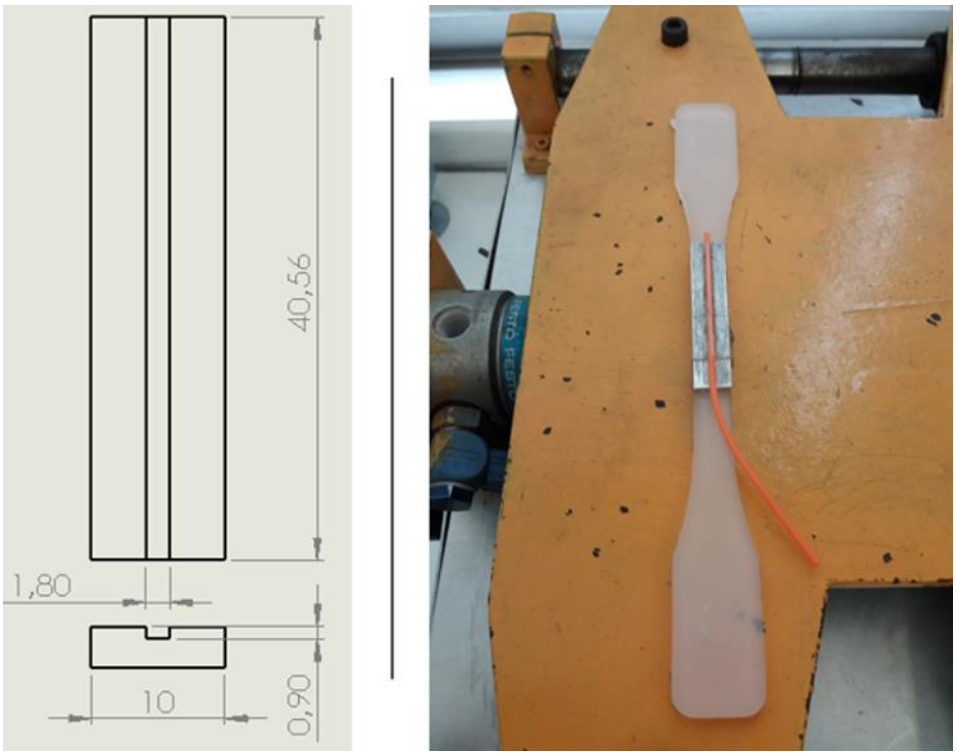

Figura 15. Peça maquinada no DONE Lab para posicionamento/junção de filamentos na máquina de soldadura.

No decorrer do processo de soldadura entre materiais diferentes, era necessário definir a temperatura de aquecimento para cada um. Por sua vez, dada a incapacidade do equipamento em definir mais do que uma temperatura na fase de aquecimento, a solução encontrada foi utilizar a temperatura capaz de fundir o material com temperatura de fusão mais alta. De facto, esta é a única condição que garante a fusão dos dois materiais permitindo que haja soldadura. Para além de ter de existir compatibilidade química entre os materiais, teremos de garantir que a quantidade de material fundido será suficiente para que haja uma boa difusão molecular na interface. A quantidade de material fundido (L0) é determinado através da temperatura e tempo de aquecimento. Face às temperaturas já selecionadas para cada ensaio, foi definido um tempo de aquecimento de 20 segundos e calculado o respetivo L0 para cada ensaio.

Nos cálculos efetuados foi usada a equação de condução de calor unidimensional, num sólido semi-infinito (equação 1). Para efeitos de cálculo, são consideradas as seguintes condições de fronteira/simplificações: todos os pontos da amostra em contacto com a placa estão à mesma temperatura (e ficam instantaneamente à temperatura da placa após contacto), do lado oposto estão à temperatura ambiente e o aquecimento é feito apenas por condução de calor da placa para os provetes (não existem perdas).

$$\frac{T_f - T_0}{T_{placa} - T_0} = \text{erfc}\ \frac{\mathrm{L}_0}{2\sqrt{\alpha t}}\ (1)$$

Onde:

$\boldsymbol{T_f}$ = temperatura de fusão do polímeros

$\boldsymbol{T_0}$ = temperatura inicial (geralmente, a ambiente)

$\boldsymbol{\alpha}$ = difusidade térmica do polímero

$\mathbf{L_0}$ = profundidade de material fundido

t = tempo de aquecimento.

Concretizados os cálculos (tabela 2), foi possível observar que em todos os casos, o valor de L0 obtido é superior ao dos batentes mecânicos, garantindo assim material mais do que suficiente para a promoção de uma boa soldadura.

Inicialmente foram colocadas duas amostras do mesmo material (PLA) nos suportes maquinados e realizado um teste de ensaio. Decorrido o teste de ensaio foi possível observar algum desalinhamento entre as duas metades soldadas. Motivado pelo desgaste que a máquina sofrera ao longo dos anos, quer a mola responsável pela fixação das amostras quer o próprio local onde estas são colocadas apresentam alguma oxidação o que dificultou a sua correta fixação. A solução encontrada foi inserir uma pequena peça entre as molas de aperto e a peça maquinada, garantindo assim uma melhor fixação das amostras, e por último pequenos pedaços de papel que colmataram as pequenas folgas existentes no local de colocação das amostras, como é visível nas Figuras 16 e 17.

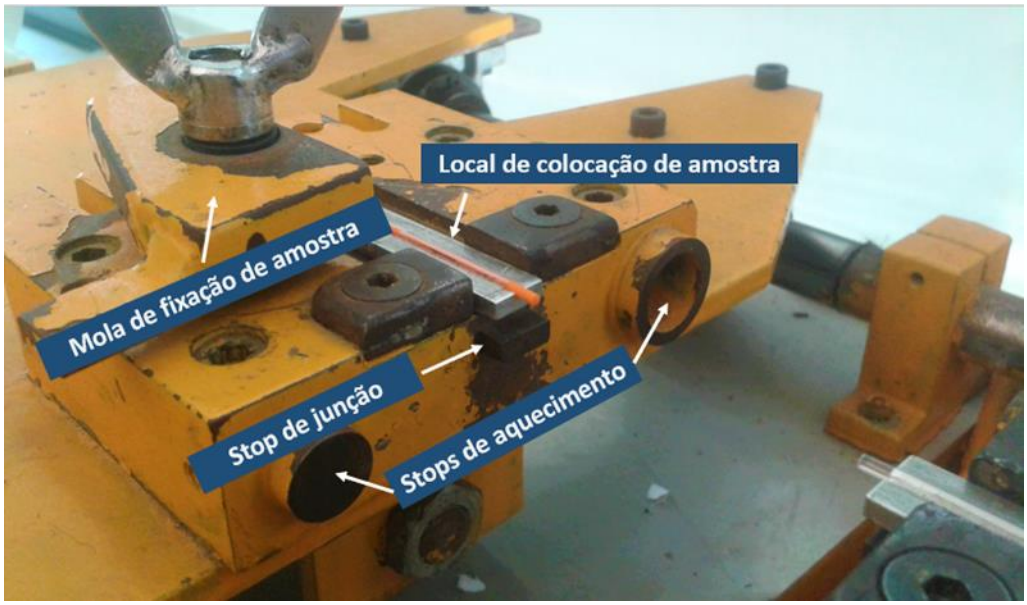

Figura 16. Identificação dos componentes da máquina de soldadura

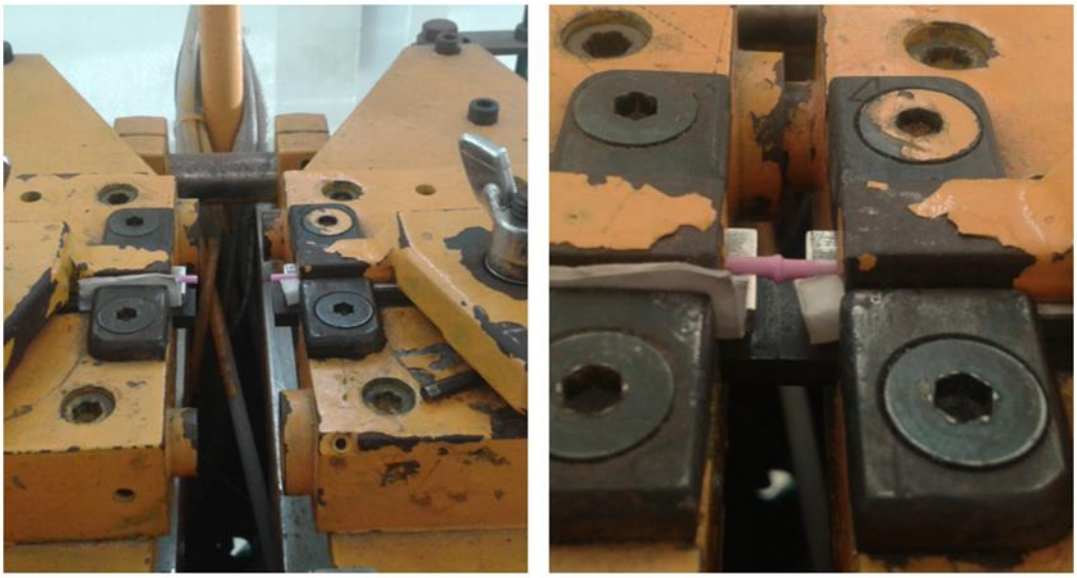

Figura 17. Teste realizado com as soluções encontradas.

Estabelecido todo o procedimento e ultrapassadas todas as dificuldades, os ensaios foram iniciados testando os diversos materiais consigo próprios e os possíveis pares de material rígido-flexível, representados na Figura 18.

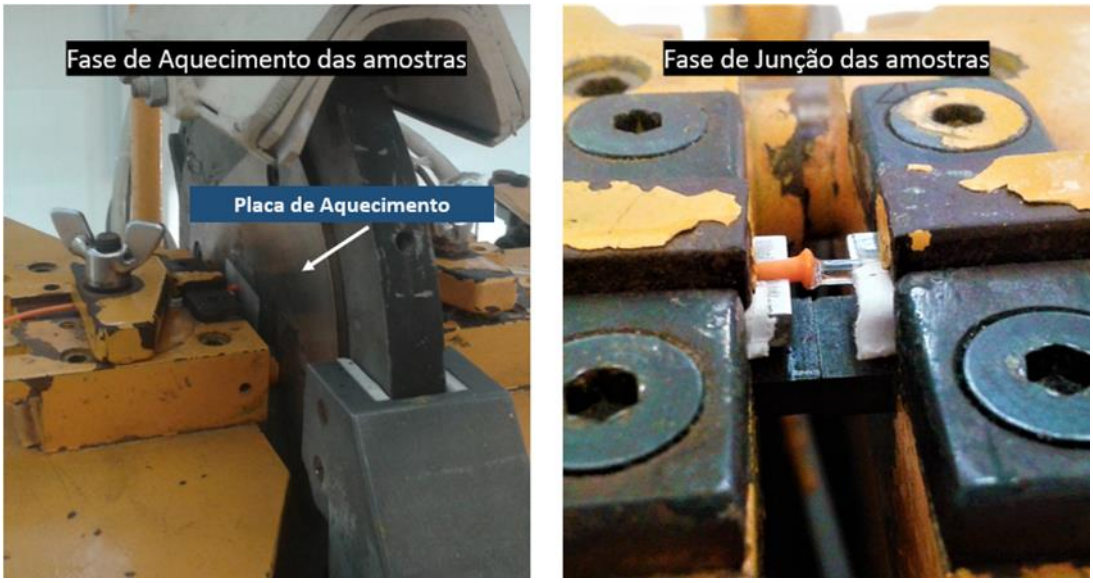

Figura 18. Ilustração do processo de soldadura do par PC – Filaflex.

3.3 Abordagem de Validação

3.3.1 Estratégia

De modo a validar o método expedito (baseado na soldadura topo-a-topo de filamentos) proposto para avaliar a compatibilidade química entre pares de materiais num ambiente idêntico à impressão 3D, sem recorrer à impressão, foi desenhada uma estratégia.

Recorrendo ao processo de soldadura topo-a-topo, os materiais previamente selecionados foram alvo de várias tentativas de soldadura quer entre si, quer entre os diversos pares de material rígido-flexível possíveis. Findado o processo de soldadura, foram selecionados os pares candidatos a serem impressos através da técnica de impressão 3D FFF.

A impressora utilizada (Fig19) é de caracter bastante versátil, dada a sua alargada amplitude que lhe permite produzir peças de pequenas a grandes dimensões, à liberdade infindável geométrica, à sua cama aquecida e aos seus quatro extrusores que lhe acrescentam uma enorme mais valia na impressão multimaterial. Graças à capacidade de a cama ser aquecida, permite e promove uma melhor adesão por parte das peças a serem impressas, melhorando por sua vez a sua fixação no decorrer de todo o processo e evita possíveis empenos nos materiais mais suscetíveis. Por último, não menos importante, o facto de possuir quatro extrusores confere-lhe uma enorme dinâmica de impressão, permitindo imprimir qualquer tipo de peça com quatro cores diferentes, mantendo o material, ou numa vertente mais exigente a possibilidade de uma impressão composta por quatro materiais diferentes.

Figura 19. Impressão 3D FFF utilizada

Em ambos os processos, foram produzidos cinco provetes. Na técnica de soldadura topo-a-topo foram recolhidas cinco amostras de filamento diretamente da bobine de cada material (provetes A e B), produzidos cinco provetes de cada material soldado consigo próprio (provetes A-A e B-B) e por último cinco provetes soldados de cada par de materiais diferentes (provetes A-B), Figura 20. O mesmo método foi aplicado à técnica de impressão 3D, sendo que, no caso dos provetes A e B estes foram também impressos na sua totalidade com um único material usando um único extrusor. No processo de impressão dos provetes A-A e B-B, foram utilizados dois extrusores alimentados com o mesmo material. Por último, na impressão dos provetes A-B, foi utilizado o método de impressão bi-material propriamente dito, recorrendo ao uso de dois extrusores e dois materiais diferentes.

No final de cada processo, foram realizados ensaios de tração visando a comparação dos dois processos de avaliação da compatibilidade, e, por último, tentar identificar o par de materiais que apresenta melhores indicadores de soldabilidade. Para efeitos de quantificação dos ensaios foi tido em conta o valor da Força Máxima e o Módulo de Young.

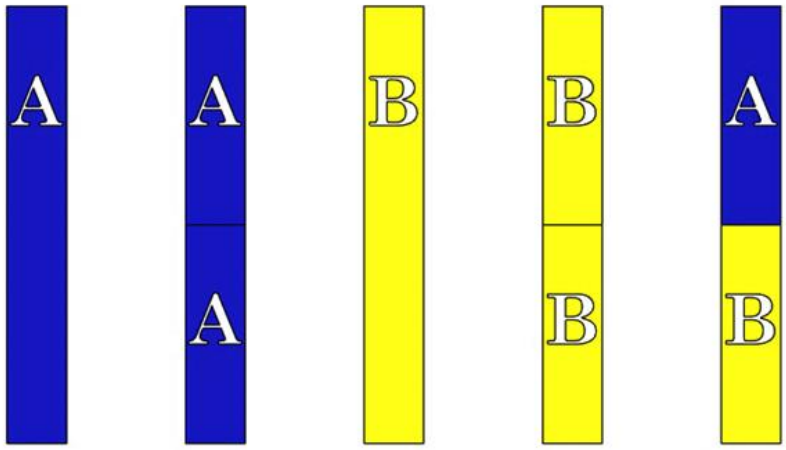

Figura 20. Esquema dos provetes usados nos ensaios mecânicos

3.3.2 Materiais

Na metodologia descrita foram utlizados uma série de materiais, criteriosamente escolhidos entre rígidos e flexíveis, que se coadunam com o propósito final da dissertação. É possível a sua divisão em dois tipos de materiais. No que toca aos materiais rígidos foram selecionados o Policarbonato, o Nylon e o G6-Impact, no campo dos materiais flexíveis a escolha recaiu sobre o NinjaFlex, Filaflex, TPC 45.

O Policarbonato (PC) é um termoplástico amorfo, duro e rígido, de alto desempenho com excelentes propriedades. Este apresenta uma alta resistência ao impacto, alta estabilidade dimensional e boas propriedades elétricas, fazendo com que seja um dos termoplásticos de engenharia mais utilizados [75].

O Nylon (PA) é um termoplástico com baixa densidade, alta estabilidade térmica e as suas propriedades são grandemente afetadas pelo grau de cristalinidade e pelo conteúdo de água. À medida que o número de átomos de carbono aumenta, a capacidade de absorver água diminui rapidamente (aumenta a estabilidade dimensional). As poliamidas estão entre os termoplásticos técnicos mais importantes e úteis, devido à sua excelente resistência ao desgaste, bom coeficiente de atrito, boa resistência química e ao impacto. As propriedades da poliamida variam do PA 66 duro e resistente ao PA 12, macio e flexível [76].

O G6-Impact é um filamento composto por uma matriz HIPS, reforçado com fibra de carbono e grafeno. Com esta composição, pretende-se conjugar a rigidez com um certo grau de flexibilidade, e um desempenho excecional no amortecimento ao choque e vibração. O material

teve como premissa para a sua criação, o desempenho em aplicações de engenharia altamente exigentes, e não uma ótica de impressão 3D quotidiana [77].

O NinjaFlex é um TPU, que para além da sua elevada flexibilidade, apresenta resistência química a muitos materiais, resistência à abrasão e uma boa capacidade de estiramento [78].

O Filaflex é um TPE, termoplástico elastómero, com uma base de poliuretano, apresenta uma grande elasticidade e uma boa resistência a solventes [79].

O TPC 45, é um TPC, que para além da sua flexibilidade apresenta uma boa resistência química, tendo também bastante durabilidade e uma excelente resistência aos raios UV [80].

3.3.3 Produção dos provetes

- **Provetes Soldados Topo-a-topo**

No processo de soldadura topo-a-topo as amostras utilizadas no estudo foram cortadas diretamente da bobine de cada material, e os provetes soldados produzidos de acordo com a sequência:

- Como primeiro passo foram cortadas dez amostras de filamento de cada bobine, com 100 milímetros de comprimento, sensivelmente;
- Posteriormente as amostras são colocadas duas a duas, lado a lado, e é feito um corte com um x-ato de modo a poder obter um corte o mais uniforme possível em ambas as faces. Este processo é feito com o intuito de garantir que na fase de aquecimento a área de contacto com a placa é a maior possível;
- As amostras são colocadas nas peças que servem de suporte ao acoplamento na máquina de soldar e fixadas com o auxílio de fita-cola;
- Os suportes, já com a amostra, são colocados na máquina de soldadura e calçados, com pedaços de papel, de forma a garantir um melhor alinhamento;
- Manualmente, os suportes onde estão colocadas as amostras, são movidos um contra o outro, permitindo verificar se as amostras se encontram alinhadas;
- Garantido o alinhamento é dado início ao processo de soldadura.

Na tabela 2, estão representadas as condições de ensaio utilizados durante o processo de soldadura topo-a-topo.

Tabela 2. Condições de ensaio dos provetes de soldadura topo-a-topo.

Materiais	Temperatura de Aquecimento (T=°C)	Tempo de Aquecimento (t=s)	Tempo de Arrefecimento (t=s)	L0 (mm)
PC - PC	270	20	30	1,54
PC – Ninjaflex				
PC – TPC 45				
PC - Filaflex				
Nylon - Nylon	250	20	30	3,4
Nylon – Ninjaflex				
Nylon – TPC 45				
Nylon - Filaflex				
G6-Impact - G6-Impact	240	20	30	1,54
G6-Impact – Ninjaflex				
G6-Impact – TPC 45				
G6-Impact - Filaflex				
Ninjaflex - Ninjaflex	215	20	30	1,54
TPC 45 -TPC 45	230			
Filaflex - Filaflex	230			

Após concluídos todos os ensaios, foram obtidos os seguintes resultados, ilustrados na tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos através do processo de soldadura topo-a-topo.

Flexível/Rígido	Policarbonato	G6-Impact	Nylon
Ninjaflex	✓	**X**	✓
TPC 45	✓	**X**	**X**
Filaflex	✓	**X**	**X**

✓ - Ocorre soldadura entre os materiais; **X** – Não ocorre soldadura entre os materiais.

Importante referir que nos ensaios efetuados usando o próprio material consigo próprio, ocorreram soldaduras em todos eles excetuando o caso particular do G6-Impact, apesar das diversas tentativas feitas. O mesmo sucedeu relativamente a este material quando usado com outros. Por essa razão, o G6-Impact foi abandonado neste estudo.

- **Provetes de Impressão 3D**

  - **Condições de impressão**

Antes de dar início à impressão dos provetes foi necessário selecionar a temperatura de impressão de cada material e a respetiva temperatura da cama de deposição. Nesse sentido foram analisadas as fichas técnicas referentes a cada um, onde constam as gamas de temperaturas de impressão, de temperatura da cama de deposição e de velocidades de impressão admissíveis.

Como ponto de partida para determinar as temperaturas adequadas à impressora em causa, foi concebida uma estrutura simples em 3D, ilustrada na Figura 21, através do software *CAD SolidWorks*. Por esta ser uma estrutura simples e de pequenas dimensões, permite efetuar as impressões necessárias com os diversos materiais, de uma forma rápida e ágil obtendo resultados num período mais curto de tempo. Mediante o intervalo de temperaturas citado pela ficha técnica e pela análise das impressões efetuadas é escolhida a temperatura mais adequada de impressão a cada material.

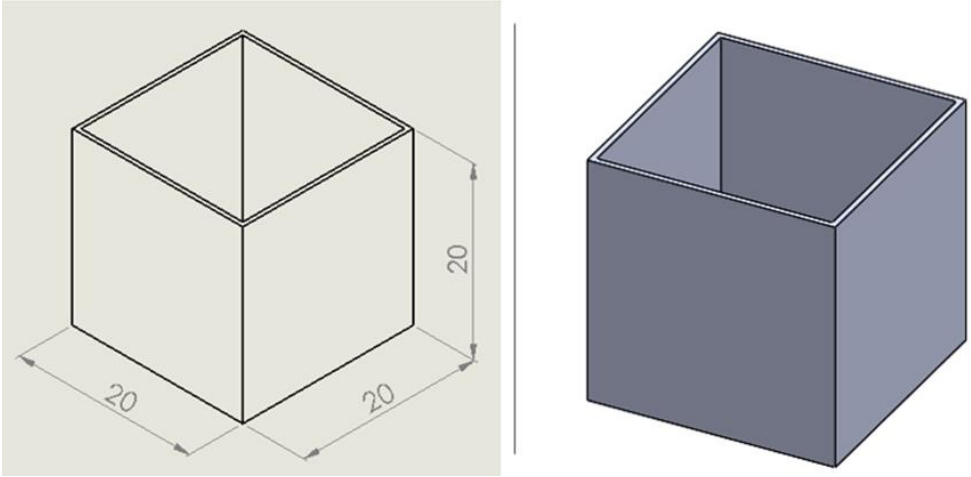

Figura 21. Estrutura usada na determinação da temperatura de impressão e temperatura da cama de deposição (escala em mm).

Após a impressão, com sucesso, dos diversos materiais foram obtidos os valores das temperaturas pretendidas, assinalados na tabela 4.

Tabela 4. Temperaturas de impressão usadas nos materiais.

Materiais	Temperatura Impressão (°C)	Temperatura cama de deposição (°C)
Filaflex	235	Material não exige
Ninjaflex	225	50
Nylon	235	45
PC	310	100
TPC 45	240	90

Com base nestas condições, procedeu-se à impressão dos provetes de tração, ilustrados na Figura 22. Estes foram desenhados através de um software *CAD*, *SolidWorks*, e posteriormente impressos segundo a técnica de impressão 3D FFF. No processo de impressão foram produzidos os três tipos de provetes anteriormente descritos (A e B, A-A e B-B, e A-B).

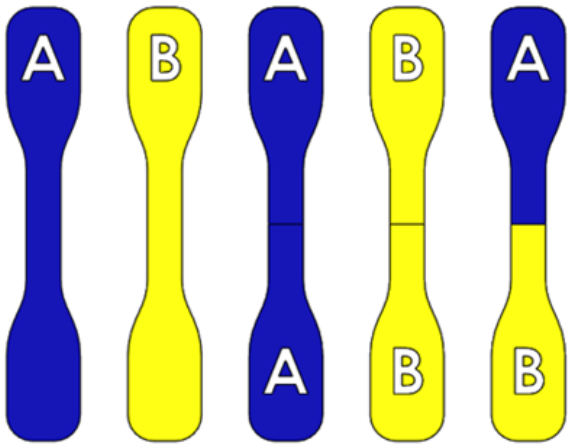

Figura 22. Exemplo ilustrativo dos diferentes tipos de provetes impressos.

Ao longo do processo de impressão, quer os materiais rígidos quer os materiais flexíveis, revelaram dificuldades e desafios à sua impressão, que obrigaram a alguma pesquisa e tentativas até serem superados.

Pelo facto de ambos os materiais rígidos serem higroscópicos e a impressora não possuir câmara fechada, tornou-se imperativo que após o período de secagem na estufa estes fossem acondicionados num ambiente controlado evitando o contacto com a atmosfera envolvente. A solução encontrada foi a construção de um compartimento estanque onde estes pudessem ser acondicionados, garantido um ambiente controlado e que não prejudicasse quer o processo de impressão quer toda a logística envolvente.

O compartimento é composto por uma caixa em PVC (Policloreto de vinilo) de 25*49*39 cm, por um tubo em alumínio, dois suportes impressos em ABS, um tubo de teflon, dois parafusos e duas porcas impressas em Nylon, dois pequenos pedaços de borracha e fita isoladora. Numa fase inicial, foram feitos dois furos em duas faces laterais da caixa, e, por conseguinte, colado um pedaço de borracha em cada uma para minimizar o impacto dos furos no isolamento da caixa. Por sua vez, os suportes impressos em ABS, permitiram o devido encaixe do tubo de alumínio. Na face virada para a impressora, foram maquinados mais dois furos onde se encaixaram os parafusos e as porcas de Nylon que permitiram encaixar o tubo de teflon que guia o filamento desde o interior da caixa até ao extrusor. Desta feita, não só foi possível garantir o devido acondicionamento do material, como um processo de impressão mais controlado. Foi ainda colocada, em torno da tampa da caixa, fita isoladora para melhorar o isolamento.

Finalizada a montagem da caixa, como é visível na Figura 23, o material previamente seco é colocado no seu interior juntamente com pequenas bolas de sílica com o propósito de absorver qualquer humidade existente dentro do recipiente.

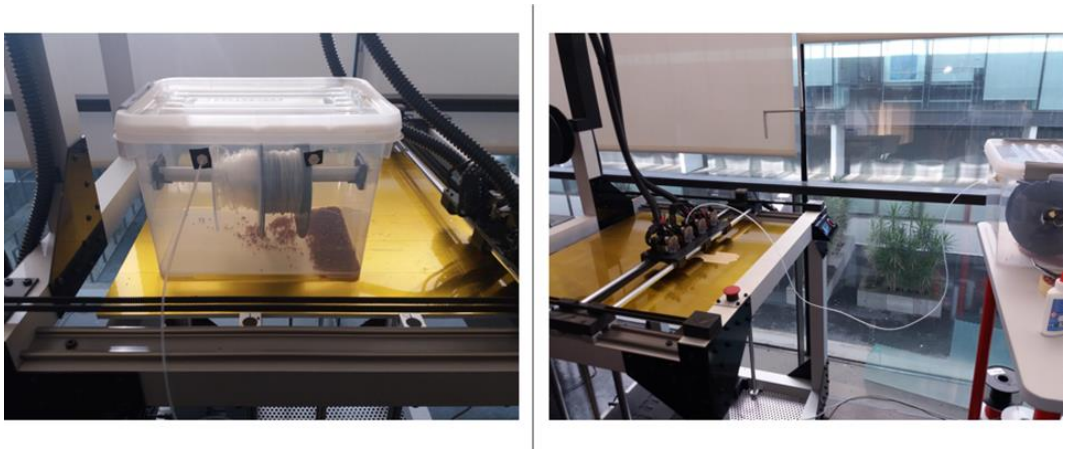

Figura 23. Caixa de acoplamento de filamentos para impressão

Com o decorrer das primeiras impressões dos provetes de Policarbonato e Nylon, foram visíveis anomalias no que toca à adesão dos mesmos à mesa de impressão, apesar do estudo prévio realizado com sucesso.

Realizada uma pesquisa sobre o sucedido foi possível apurar que estes dois materiais careciam de cuidados especiais no que toca à adesão com a mesa de impressão. No site do software utilizado para a impressão, o *simplify3D*, na aba *Support > Materials Guide*, é referido que no caso do Policarbonato seria necessário usar uma base de PEI a revestir a mesa de impressão (Fig.24a). No caso do Nylon seria necessário colocar fita cola sobre a mesa de impressão e posteriormente embebê-la com cola líquida (Fig.24b).

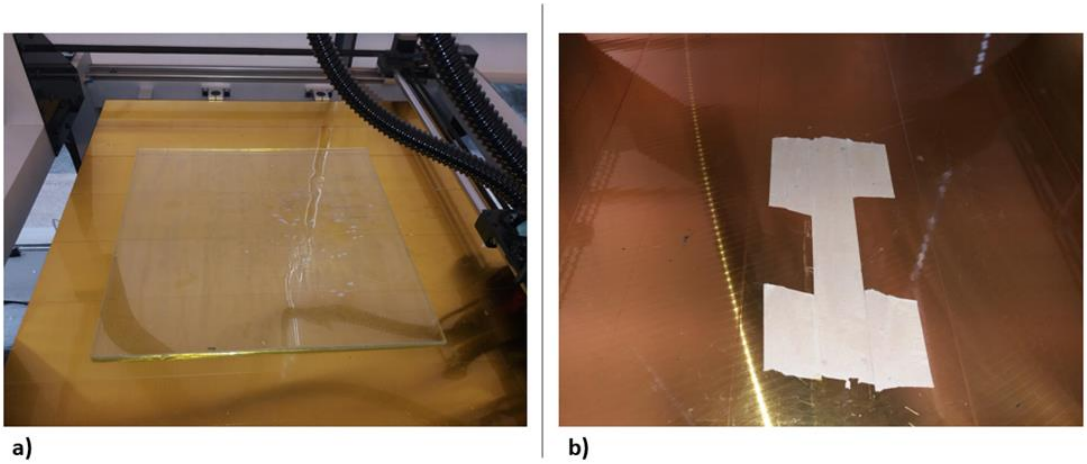

Figura 24. Representação das soluções encontradas para melhoria de adesão dos materiais. a) revestimento da mesa com PEI para o Policarbonato; b) fita-cola embebida com cola para impressão do Nylon.

Por último, situação comum aos materiais rígidos e flexíveis, foi necessário afinar a força de aperto do sistema de alimentação para cada material. Este sistema é responsável por impelir o filamento para o interior do *nozzle*, alimentando o mesmo ao longo de toda a impressão. No caso dos materiais flexíveis este deve estar totalmente folgado, dada a natureza do material, sob pena de provocar estrangulamento do mesmo provocando falhas de impressão. Porém, nos materiais rígidos aplica-se o contrário, exigindo dessa forma alguma força de aperto para aumentar o atrito entre o filamento e o sistema de alimentação.

Colmatadas todas as etapas acima citadas, foi possível imprimir todos os provetes para posterior caracterização mecânica.

Os parâmetros de impressão fixos utilizados, encontram-se discriminados na Tabela 5, 6 e 7.

Tabela 5. Parâmetros de impressão provetes tipo A e B.

Amostras	Filaflex	Ninjaflex	Nylon	PC	TPC 45
Extrusora					
Diâmetro do *nozzle* (mm)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Multiplicador de extrusão	0,95	0,95	0,95	1,1	0,9
Largura de extrusão (mm)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Camadas					
Altura da primeira camada (mm)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Número de camadas sólidas superiores	3	3	3	3	3
Número de camadas sólidas inferiores	3	3	3	3	3
Número de perímetros	3	3	3	3	3
Enchimento					
Enchimento (%)	100	100	100	100	100
Orientação do enchimento	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45
Velocidade de Impressão					
Velocidade de impressão (mm/s)	15	10	10	15	10
Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	60	60	60	60	60
Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3	3	3	3	3

Tabela 6. Parâmetros de impressão provetes tipo A-A e B-B.

Amostras	Filaflex	Ninjaflex	Nylon	PC	TPC 45
Extrusora					
Diâmetro do *nozzle* (mm)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Multiplicador de extrusão	0,95	0,95	0,95	1,1	0,9
Largura de extrusão (mm)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Camadas					
Altura da primeira camada (mm)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Número de camadas sólidas superiores	3	3	3	3	3
Número de camadas sólidas inferiores	3	3	3	3	3
Número de perímetros	3	3	3	3	3
Enchimento					
Enchimento (%)	100	100	100	100	100
Orientação do enchimento	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45
Velocidade de Impressão					
Velocidade de impressão (mm/s)	15	10	10	15	10
Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	60	60	60	60	60
Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3	3	3	3	3

Tabela 7. Parâmetros de impressão provetes tipo A-B.

Amostras	**Filaflex (A) - Policarbonato (B)**		**Ninjaflex (A) – Nylon (B)**		**TPC 45 (A) – Policarbonato (B)**	
Extrusora						
	A	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**
Diâmetro do *nozzle* (mm)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Multiplicador de extrusão	0,95	1,1	0,95	0,95	0,9	1,1
Largura de extrusão (mm)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Camadas						
Altura da primeira camada (mm)	0,28		0,28		0,28	
Número de camadas sólidas superiores	3		3		3	
Número de camadas sólidas inferiores	3		3		3	
Número de perímetros	3		3		3	
Enchimento						
Enchimento (%)	100		100		100	
Orientação do enchimento	45/-45		45/-45		45/-45	
Velocidade de Impressão						
Velocidade de impressão (mm/s)	15		10		10	15
Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	60		60		60	

Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3	3	3

3.3.4 Caracterização

Concluído o processo de impressão, foram realizados ensaios mecânicos quer com os provetes obtidos pelo processo de soldadura quer com os provetes obtidos por impressão 3D. Em ambos os casos foram testados os três diferentes tipos de provetes.

- **Ensaio de Tração**

Ao realizar um ensaio de tração, um corpo de prova ou provete é submetido a um esforço uniaxial que tenderá a alongá-lo até à sua rotura. Na zona inicial do teste, a amostra exibe uma relação linear entre a força aplicada e o alongamento. Nessa região linear, o material obedece à Lei de Hooke (equação 2), havendo proporcionalidade entre a tensão (σ) aplicada ao material e a deformação (ε) gerada, E é o módulo de Young. Quando esta tensão (σ) é retirada, o corpo recupera completa e instantaneamente a sua forma inicial.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

A tensão é determinada pela equação (3), onde F corresponde à força aplicada (N) e A à área da secção transversal do provete, e a deformação (ε) pela equação (4) em que ΔL corresponde ao alongamento e $l0$ à distância entre amarras.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l0} \quad (4)$$

Na realização dos ensaios de tração, recorreu-se ao uso de uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 5969 (Fig.25), tendo sido testados 5 provetes por cada condição.

Figura 25. Equipamento utilizado no ensaio de tração

Os parâmetros usados nos ensaios encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros usados no ensaio de tração.

	Velocidade de tração (mm/min)	**Distância entre amarras (mm)**
Provete de Soldadura	50	110
Provete de Impressão 3D	50	20

3.4 Resultados dos Ensaios de Tração

Neste subcapítulo irão ser apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de tração, referentes a todas as amostras ensaiadas. Para efeitos do estudo foram avaliados os parâmetros força máxima e módulo de Young.

Na Figura 26, podemos observar a força máxima de amostras de material, cortadas diretamente da bobine (filamento), e do material soldado consigo próprio (escala logarítmica).

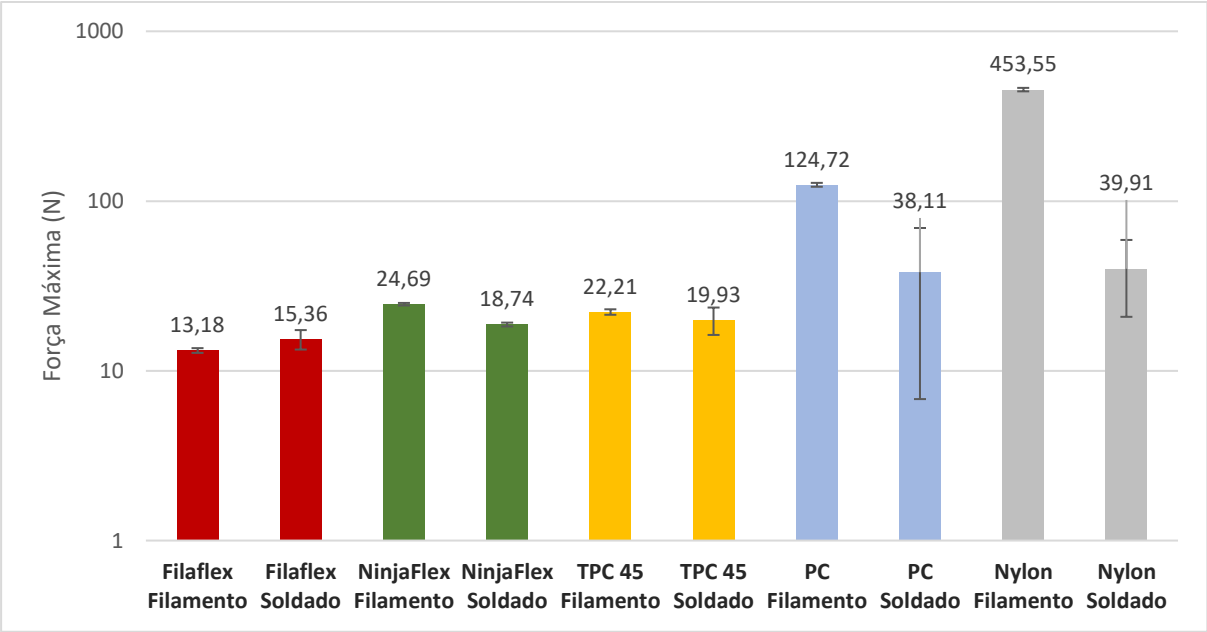

Figura 26. Força máxima de filamentos e filamentos soldados consigo próprios.

Representados pelas cores vermelha (Filaflex), verde (Ninjaflex) e amarelo (TPC 45) estão os três matérias flexíveis e pelas cores azul (PC) e cinzento (Nylon) os materiais rígidos. A comparação é feita com o propósito de avaliar a qualidade da soldabilidade de um material consigo próprio. Os materiais Policarbonato e Nylon, apresentam uma perda significativa do valor da força máxima aquando da soldadura consigo próprios. As cinco amostras testadas de cada material, durante o ensaio, apresentaram um comportamento bastante díspar umas das outras, tendo-se verificado roturas mal se iniciou o ensaio.

Uma possível explicação, na visível distinção de valores entre os materiais rígidos e flexíveis, poderá residir no facto de os materiais flexíveis apresentarem um comportamento dúctil e quando sujeitos ao esforço axial este é distribuído por todo o provete, caso que não acontece nos materiais rígidos, sendo o esforço maioritariamente sentido na zona de soldadura (zona de maior fragilidade). Nos materiais rígidos, algum desfasamento entre as amostras aquando da sua junção (de notar que a área útil da amostras é bastante pequena), pode justificar os resultados.

De um modo geral, é possível observar uma diminuição dos valores obtidos nas amostras, sujeitas a soldadura, em comparação com os seus respetivos filamentos, como espetável. A sustentar essa diminuição, está o facto de a zona de soldadura, uma zona de descontinuidade, ser sempre uma zona de maior fragilidade em qualquer material.

Ilustrado na Figura 27, está representada uma normalização adimensional, onde é possível observar a resistência dos filamentos soldados consigo próprios em comparação com o mesmo filamento retirado diretamente da bobine.

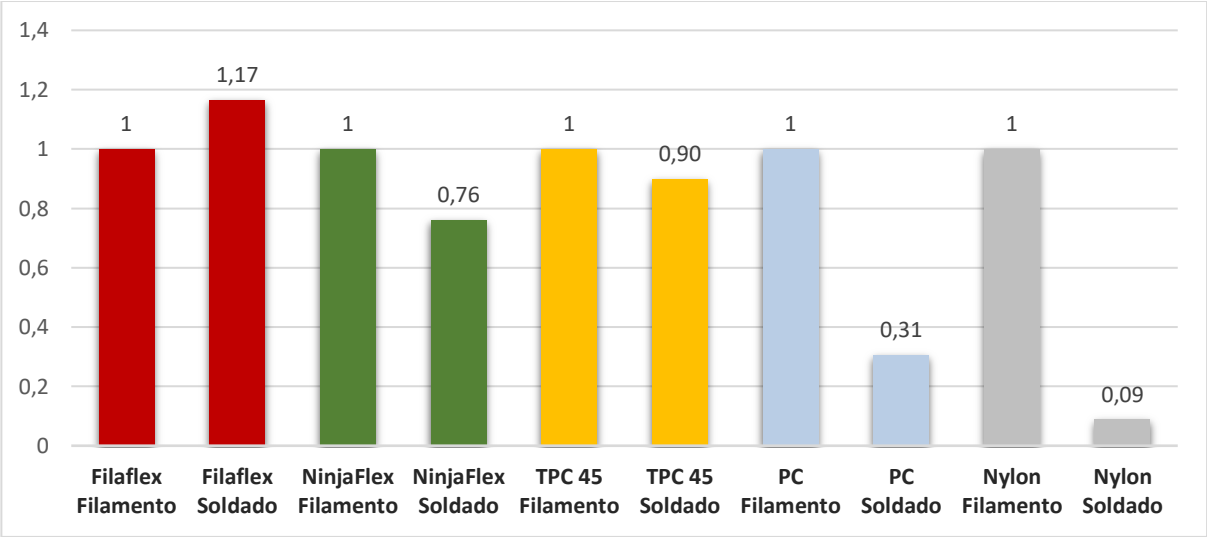

Figura 27. Resistência dos filamentos soldados e filamentos retirados da bobine.

Os filamentos retirados diretamente da bobine, assumem o valor de referência de 1 e, por sua vez, é feita a divisão do valor da força máxima dos filamentos soldados pelo valor do filamento correspondente.

É possível de uma forma muito mais clara, observar a perda de resistência por parte dos materiais soldados quando comparados com os seus filamentos. Em sentido contrário, à maioria dos materiais, o Filaflex soldado apresenta um valor ligeiramente superior ao seu filamento, possivelmente devido ao aumento da área útil gerada pela barbela no decorrer do processo. Por último, é notória a perda substancial de resistência por parte dos materiais rígidos (PC e Nylon) em comparação com os materiais flexíveis.

Representado na Figura 28, é visível a comparação do módulo de Young de filamentos e filamentos soldados consigo próprios.

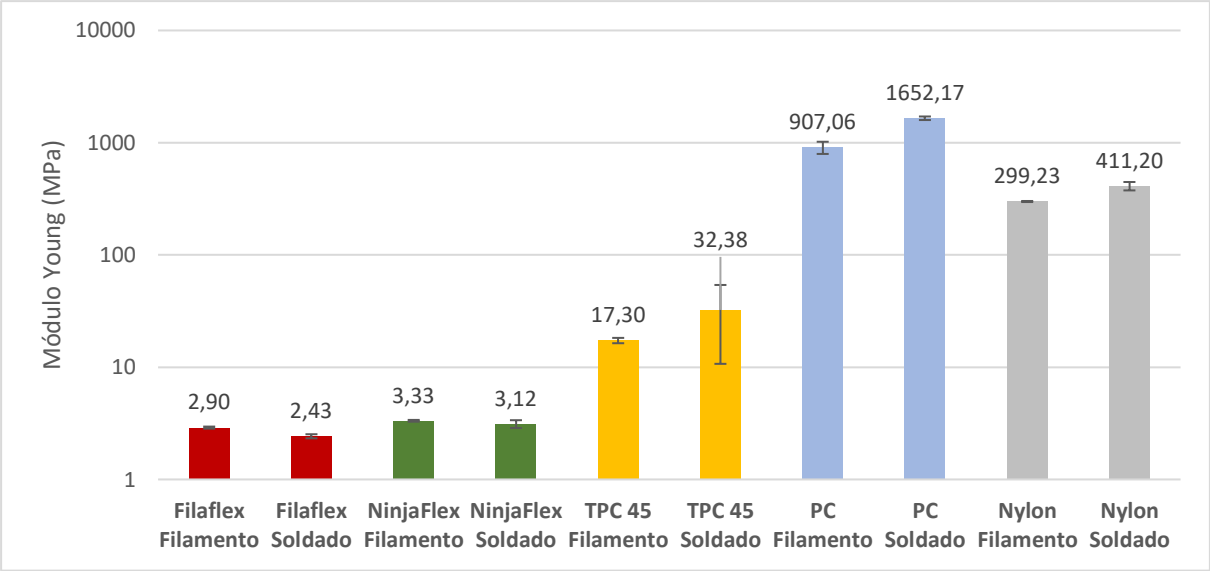

Figura 28. Módulo de Young de filamentos e filamentos soldados consigo próprios.

Dado que o módulo de Young é uma característica intrínseca de cada material, seria espectável, entre os seus pares, visualizar valores dentro da mesma gama. No caso particular dos materiais flexíveis, os valores encontram-se dentro da mesma gama, excetuando o caso do TPC 45 soldado que apresenta um valor superior ao seu par, mas com um desvio padrão acentuado. Quanto aos materiais rígidos, as amostras soldadas exibem uma gama de valores quase duas vezes superior aos seus filamentos originais, o que poderá advir de uma área superior na zona de soldadura ('barbela').

Com o intuito de eleger o melhor par híbrido, é visível na Figura 29, a força máxima obtida entre as amostras soldadas consigo próprias e o par híbrido resultante.

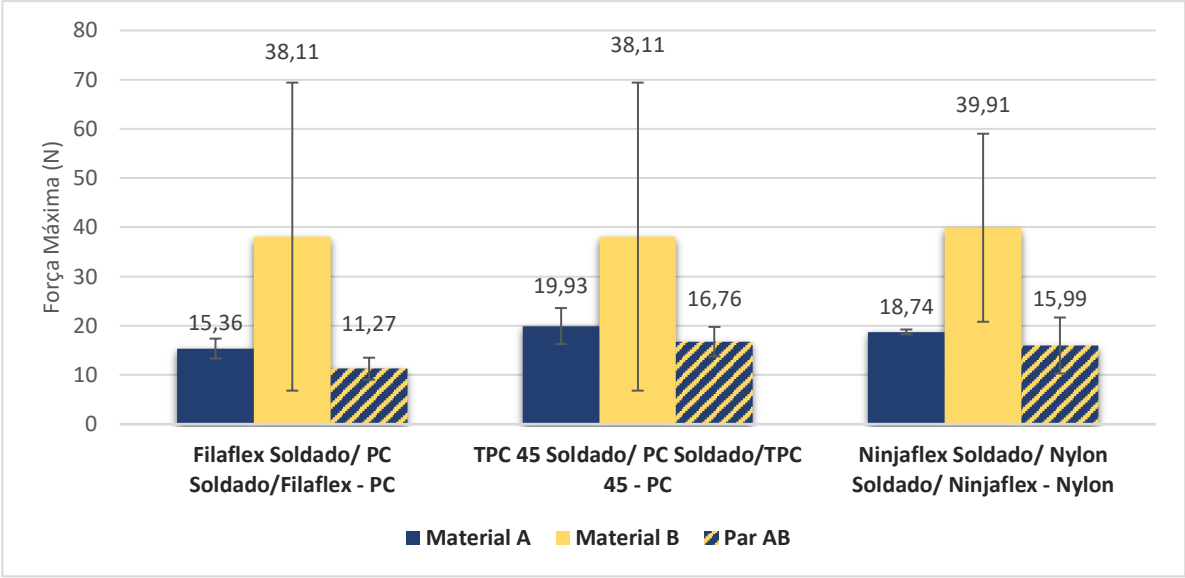

Figura 29. Força máxima de filamentos soldados e pares de materiais diferentes soldados.

Durante os ensaios dos três pares híbridos, foi visível um estiramento ao longo do tempo, essencialmente na metade flexível do provete e a rotura dos mesmos ocorreu na zona de soldadura. Seria de esperar que os valores da força máxima obtidos, pelos pares híbridos, fossem pelo menos próximos do menor valor de um dos seus constituintes. Tal seria espectável, dado que na junção de ambos os materiais, possivelmente o que irá limitar o desempenho do par será o material mais fraco. Desta feita, fazendo uma leitura dos valores recolhidos é possível comprovar que o mesmo acontece nos três pares híbridos obtidos, tendo registado o par híbrido um valor de força máxima próximo do menor valor registado por um dos seus constituintes.

Em conclusão, os resultados obtidos foram ao encontro do espectável por parte dos três pares híbridos, sendo os mesmos elegíveis para o restante trabalho a realizar.

Por último, na Figura 30, é também avaliada a soldadura entre os diferentes pares híbridos através do seu módulo de Young.

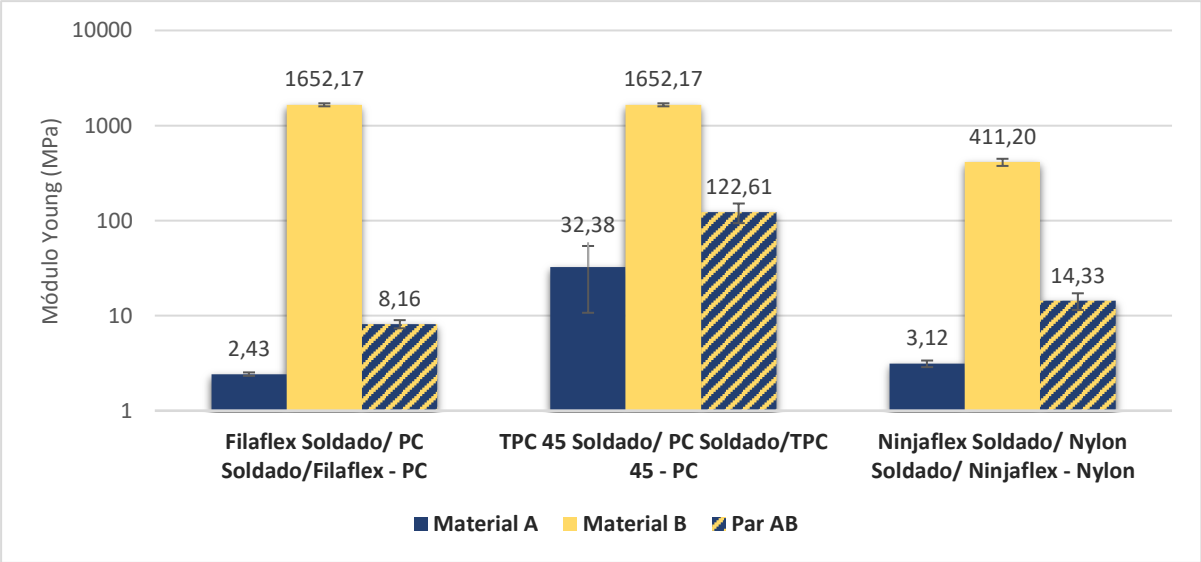

Figura 30. Comparação do módulo de Young entre filamento soldado e pares de materiais soldados.

Em ambos os casos, observa-se que o valor do módulo de Young do par híbrido se encontra entre os valores obtidos para cada um dos seus constituintes, sendo este sempre mais próximo do de menor valor. Os valores recolhidos são tidos como bons indicadores da soldadura entre os pares, pois caso estes fossem inferiores aos de menor valor e/ou próximos de zero demonstrariam incompatibilidade.

Resultados obtidos após realização dos ensaios mecânicos dos provetes 3D.

Concluídos os ensaios mecânicos, na Figura 31, são visíveis os pares híbridos obtidos pelo processo de impressão 3D.

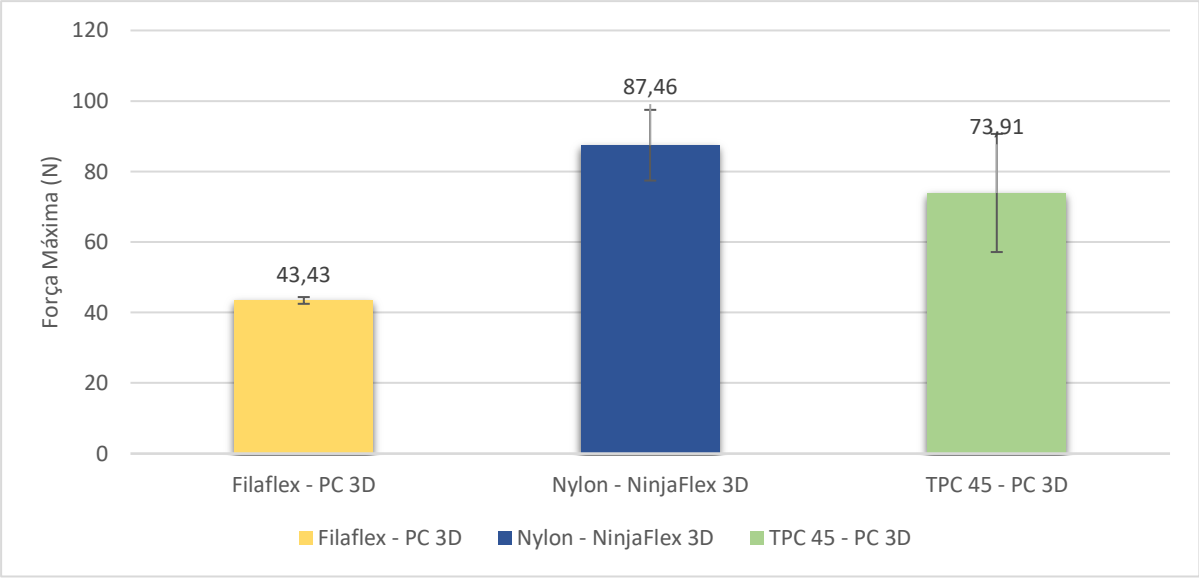

Figura 31. Força Máxima dos pares híbridos obtidos por impressão 3D

Tendo presente o verdadeiro propósito de todo o trabalho desenvolvido, a impressão 3D de uma estrutura híbrida, a escolha do par mais adequado deverá ter em conta a análise dos resultados obtidos, através dos ensaios mecânicos, bem como o comportamento dos próprios materiais no decorrer do processo de impressão 3D. Este último critério é fulcral no possível sucesso do projeto, pois é de extrema importância garantir uma boa adesão entre os materiais e garantir uma boa coesão entre as diferentes camadas da estrutura. Após a leitura dos dados recolhidos, em comparação com o gráfico da Figura 29, é possível observar alguma similaridade entre os dados obtidos pelos dois processos, atestando desta forma toda a metodologia adotada na seleção de pares de materiais híbridos.

Os pares híbridos constituídos pelo Policarbonato, como material rígido, apresentam valores entre os 40 e 74 N de força máxima, estando este último próximo dos 87,46 N registados pelo par Nylon-NinjaFlex. Agregando os resultados obtidos e as exigências por parte do seu processo de impressão, o Policarbonato não se apresenta como o melhor candidato a desempenhar o papel de material rígido. O seu processo de impressão exigiu temperaturas bastante altas, 310°C, obrigando o extrusor a trabalhar muito perto do seu limite de temperatura, o próprio *nozzle* entupiu por diversas vezes e a coesão entre camadas não era tão boa como a obtida nos provetes de Nylon. Em suma, a escolha final recaiu sobre o par híbrido Nylon-NinjaFlex dado os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos e pelo excelente comportamento de ambos os materiais no processo de impressão.

Na Figura 32 mostra-se a tensão de rutura correspondente a cada par híbrido obtido pelos dois diferentes processos de conceção dos provetes.

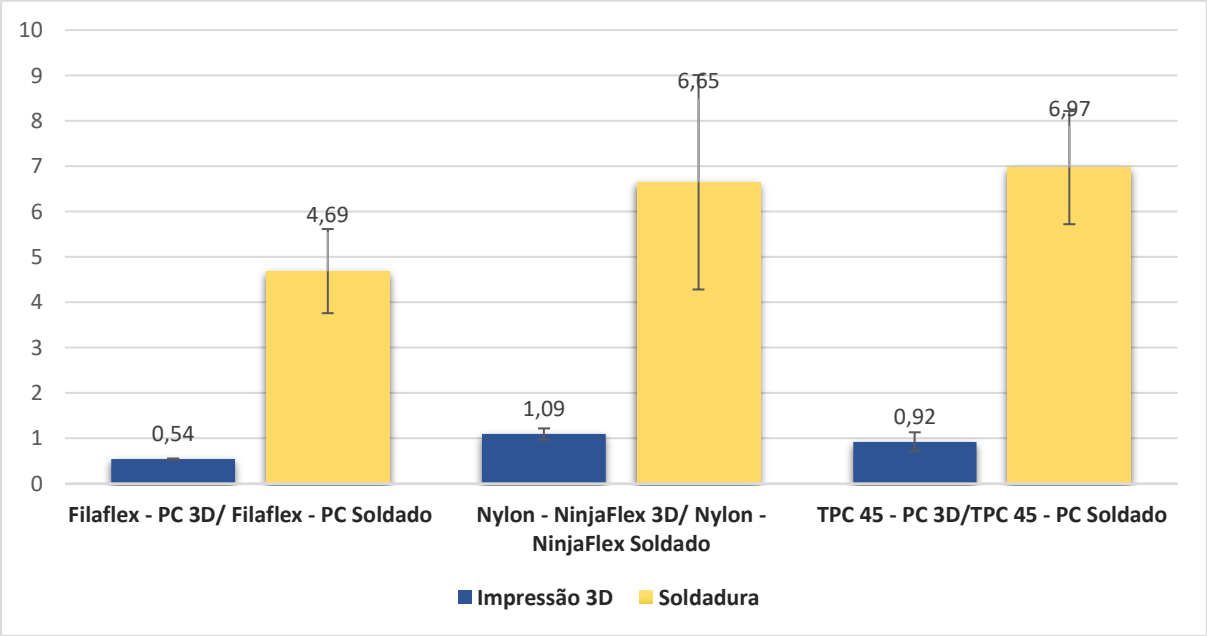

Figura 32. Tensão de rutura dos diferentes pares híbridos obtidos pelos processos de soldadura e de impressão 3D.

Representados a amarelo estão os provetes híbridos obtidos pelo processo de soldadura e a azul, os provetes híbridos obtidos pelo processo de impressão 3D. Como se pode verificar, os pares obtidos pelo processo de soldadura apresentam tensões de rutura superiores às dos seus homólogos impressos. Estas diferenças de valores estarão, certamente, associadas a diferenças dos processos de produção. No processo de soldadura o material é aquecido e é aplicada uma pressão promovendo a difusão molecular na interface entre os dois materiais, ao passo que no processo de impressão o material é aquecido e depositado na cama de impressão não existindo qualquer pressão que promova a união das mesmas. No que toca aos corpos de prova, os filamentos são muito mais homogéneos, mais compactos e apresentam uma área na interface bastante menor. Por contraponto os corpos de prova impressos têm sempre vazios e são suscetíveis a oscilações do próprio processo (eixos descalibrados, avaria nos termopares) promovendo dessa forma imperfeições na estrutura impressa.

Na Figura 33, são expostas as curvas tensão-deformação representativas de cada um dos quatro tipos de provetes de NinjaFlex usados no estudo de seleção.

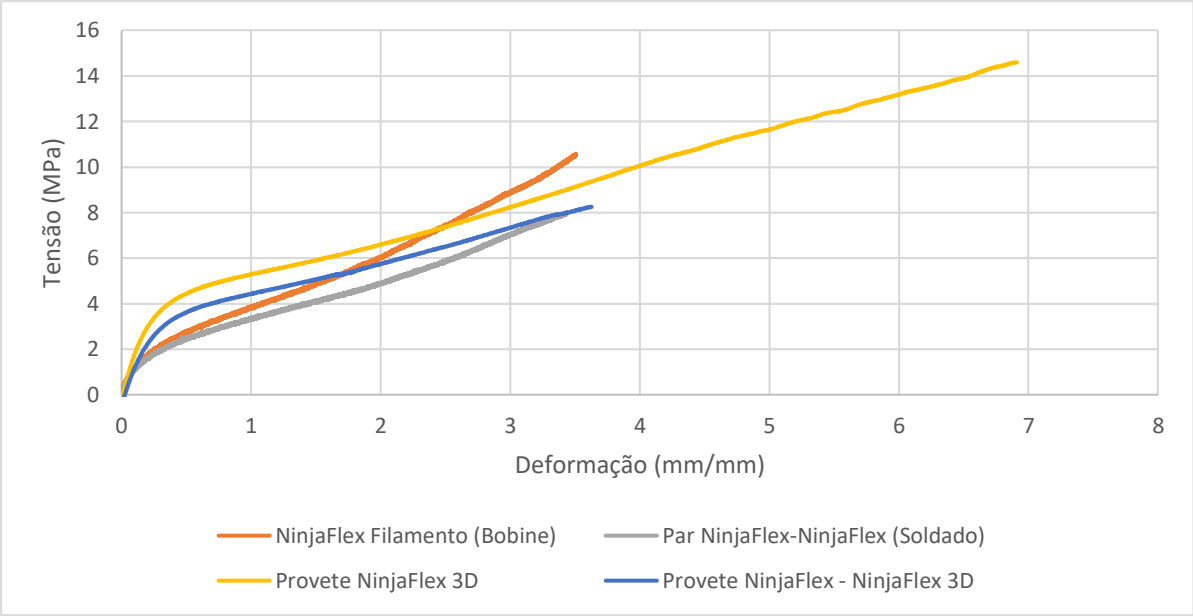

Figura 33. Representação dos quatro diferentes provetes obtidos com o TPU – NinjaFlex.

As curvas laranja e cinza, respetivamente o filamento retirado diretamente da bobine e o filamento soldado consigo próprio (processo de soldadura). As restantes, amarelo e azul, são relativas ao processo de impressão 3D, nomeadamente provete impresso unicamente por um extrusor e o provete impresso com o mesmo material por dois extrusores, respetivamente. Em representação de cada um dos casos foi usado unicamente um dos cinco provetes testados mecanicamente.

Na Figura 34, divididos por processos, estão os quatro diferentes tipos de provetes de NinjaFlex produzidos.

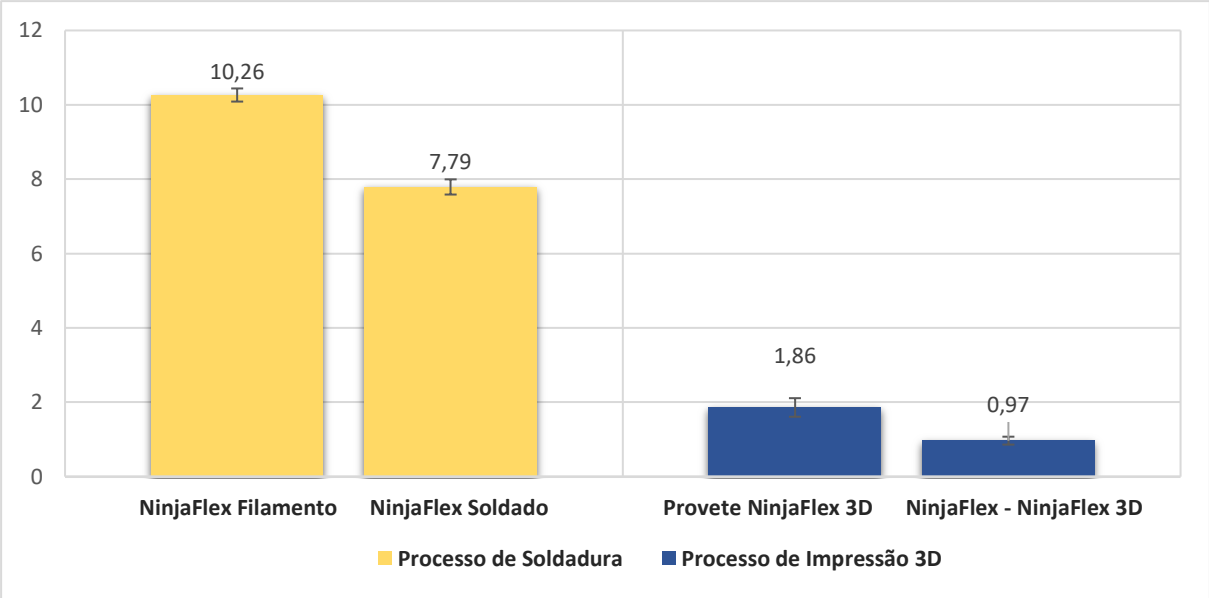

Figura 34. Tensão de rutura dos quatro tipos de provetes de NinjaFlex, obtidos pelos processos de soldadura e de impressão.

Representados pela cor amarela, do lado esquerdo do gráfico, são visíveis os dois provetes obtidos no processo de soldadura e, por sua vez, à sua direita a azul, os dois provetes obtidos no processo de impressão 3D. Em ambos os casos, existe uma perda de força máxima da primeira coluna para a segunda coluna, situação espectável e sustentada pelo facto de os provetes representados pela segunda coluna serem fruto de um processo não contínuo, implicando a junção de duas interfaces, que resulta numa zona de maior fragilidade. Com o decorrer dos ensaios mecânicos dos provetes, representados pela primeira coluna de cada processo, foi visível a elevada flexibilidade do material, tendo sido atingido o limite máximo de deslocamento por parte do equipamento sem a ocorrência da rotura dos vários corpos de prova testados. A discrepância de valores obtidos, entre os dois diferentes corpos de prova, residirá no facto de o filamento ser bastante fino, com um diâmetro de 1,75 mm, contrastando com a área de secção transversal dos provetes impressos. Em todo o caso, é importante realçar a coesão obtida entre camadas nos provetes impressos, mesmo depois de realizados os ensaios, validando desta forma a qualidade da sua impressão. Por sua vez, os provetes de Ninjaflex soldado, apresentaram também elevadas deformações (não atingindo a rotura), e os provetes Ninjaflex-Ninjaflex 3D sofreram rotura após alguma deformação, na zona de união entre as duas interfaces. A hipotética explicação, para os resultados obtidos pelos provetes soldados, poderá residir nas excelentes capacidades do processo em unir duas interfaces, já discutidas anteriormente, combinada com a elevada flexibilidade do material que impõe uma distribuição da força exercida por todo o corpo de prova, não a fazendo sentir maioritariamente na zona de

soldadura. Por último, os provetes 3D impressos por dois extrusores resultam meramente da deposição de várias camadas, umas em cima das outras, tornando essa interface bastante mais frágil quando comparada com a obtida pelo processo de soldadura.

Na Figura 35, são expostas as curvas tensão-deformação representativas de cada um dos quatro tipos de provetes de Nylon usados no estudo de seleção.

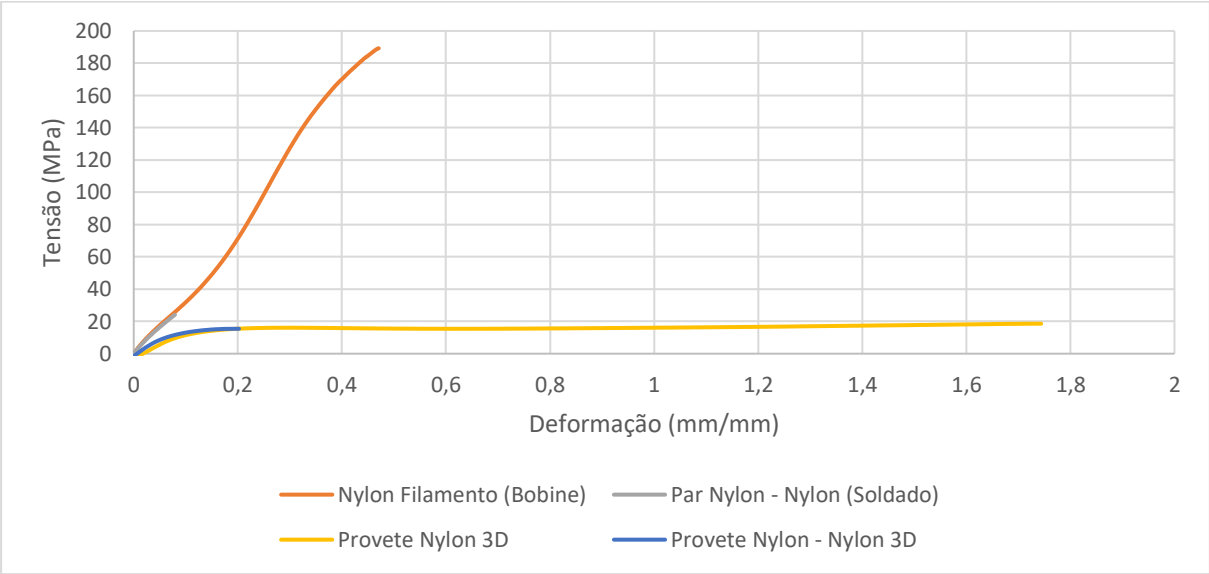

Figura 35. Curvas tensão-deformação dos quatro tipos de provetes de Nylon obtidos pelos processos de soldadura e de impressão.

Nesta figura é visível uma notória distinção entre os dois processos utilizados na conceção dos corpos de prova. Representados pelas curvas cinza e laranja, os provetes provenientes do processo de soldadura, e amarelo e azul os provetes 3D.

Por sua vez, representados na Figura 36, divididos pelos dois processos, estão os quatro diferentes tipos provetes de Nylon produzidos.

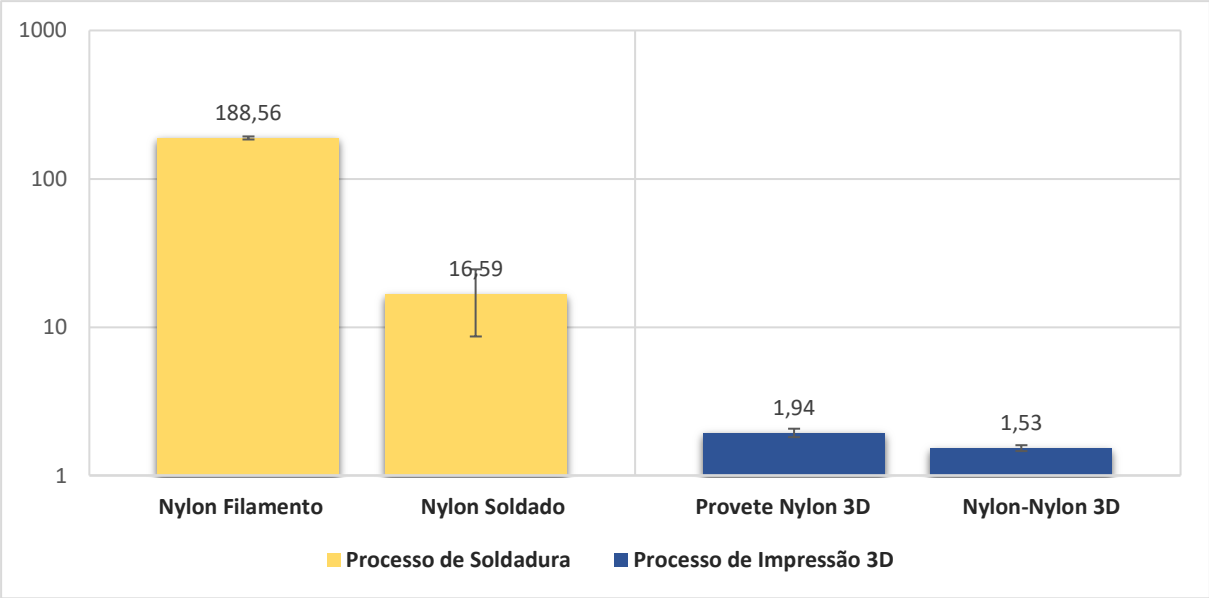

Figura 36. Tensão de rutura dos quatro tipos provetes de Nylon, obtidos pelos processos de soldadura e de impressão.

Novamente, à esquerda do gráfico, figuram os provetes provenientes do processo de soldadura, e à sua direita os provetes provenientes da impressão 3D. De igual forma, é visível uma perda de força máxima das primeiras colunas de cada processo, para as suas respetivas segundas colunas. Em destaque apresenta-se o Nylon filamento, como material rígido, tendo registado um valor de tensão à rutura a rondar os 188 N. Durante os ensaios mecânicos, após algum deslocamento, os cinco corpos de prova testados, acabaram por sofrer rotura junto das amarras da máquina de tração. Focando as atenções na segunda coluna amarela e azul, em ambos os casos, após algum deslocamento, os cinco corpos de prova de ambos os processos, romperam pela zona de junção das duas interfaces (zona de maior fragilidade). Por último, é de referir que nos provetes 3D impressos por um só extrusor, à medida que os provetes sofriam deformação foi-se observando a rotura progressiva dos filamentos que os constituem, até à rotura total.

Por último, é feita a comparação dos cinco corpos de prova híbridos obtidos por soldadura topo-a-topo e impressão 3D, visível na Figura 37, através dos gráficos tensão – deformação.

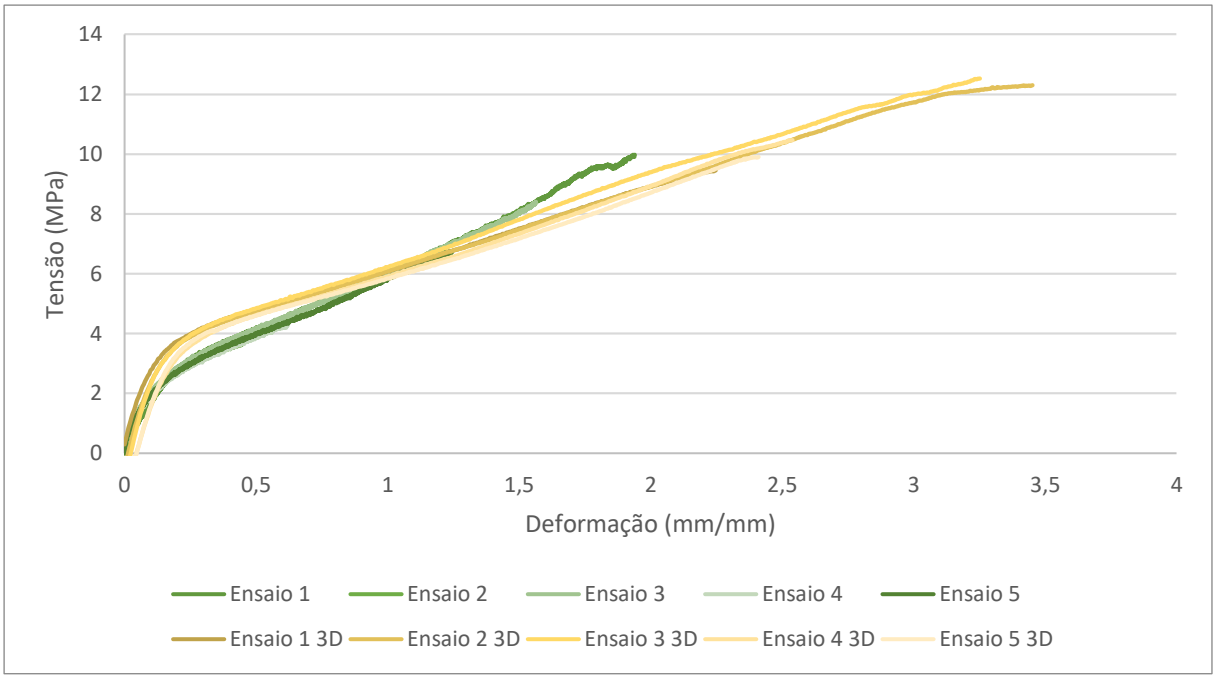

Figura 37. Curvas tensão-deformação dos cinco corpos de prova híbridos, obtidos através dos processos de soldadura e de impressão 3D.

Em tons de verde são visíveis as curvas correspondentes ao processo de soldadura e, por sua vez, em tons de amarelo, as curvas correspondentes ao processo de impressão 3D. Ao longo dos ensaios mecânicos dos corpos de prova, e para os dois processos, a parte rígida do corpo híbrido manteve-se praticamente intacta, tendo sido a parte flexível a sofrer deformações. Nos dois processos, todos os corpos de prova sofreram rotura na zona de união entre a interface rígida e flexível. É também observável a consistência dos resultados obtidos para cada tipo de processo.

Após a conclusão de todo o estudo realizado ao longo de todo este capítulo, não só foi possível selecionar um par híbrido com possibilidades de ser impresso, bem como atestar a capacidade por parte do processo de soldadura como método expedito na seleção de pares de materiais. Analisados os resultados de ambos os processos, os dados recolhidos apresentam similaridade, demonstrando uma total capacidade por parte do processo de soldadura de produzir de uma forma prática indicadores viáveis para uma posterior impressão 3D de estruturas híbridas.

4. IMPRESSÃO 3D DE ESTRUTURAS HÍBRIDAS

A estrutura híbrida, que será impressa permitindo testar a compatibilidade entre o par de materiais selecionado, é inspirada no Nacre (Fig.38). O Nacre, é um dos materiais mais estudados no campo da biomimética, é a camada interna de material iridescente de alguns moluscos, como conchas de gastrópodes e bivalves. Este é um dos materiais naturais que impregnam estruturas hierárquicas para alcançar uma elevada resistência a partir de constituintes relativamente fracos [81].

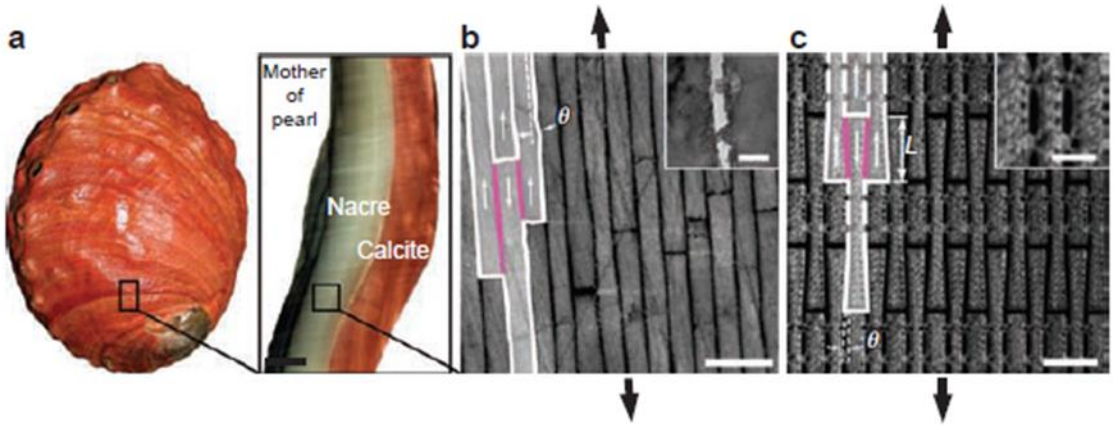

Figura 38. Estrutura hierárquica do Nacre [81].

4.1 Resolução do Equipamento

Dado o detalhe dimensional exigido na impressão de estruturas híbridas bioinspiradas, foi necessário delinear uma estratégia que permitisse determinar a resolução de impressão do equipamento. Fazendo uso fruto de mais uma das polivalências do equipamento, graças à possibilidade de permitir acoplar *nozzle's* de diversos tamanhos, foi desenhada uma estrutura com o auxílio do *SolidWorks* com o objetivo de realizar diversas impressões com os diversos *nozzles* disponíveis, a fim de quantificar o seu poder de resolução. A mesma inspirou-se na "estrutura" de uma folha de árvore (ilustrada na Figura 39), com um comprimento de 16x16 mm, uma largura de 1 mm e zonas com ângulos de 45° e 90°. As impressões foram feitas com o método de impressão bi-material, como exigido pela natureza do projeto.

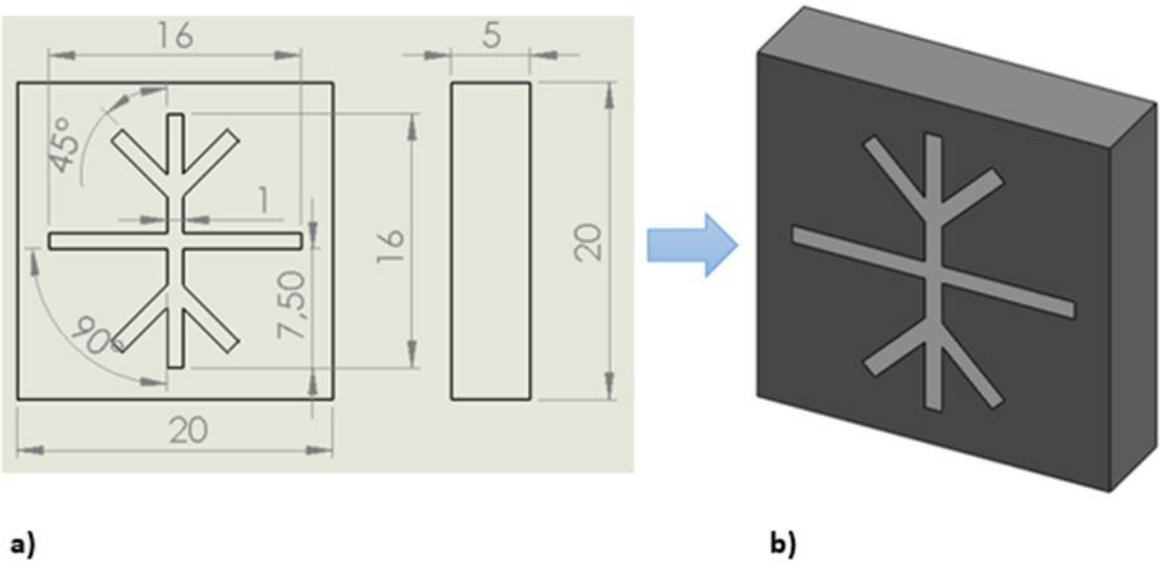

Figura 39. Componente usado para determinar resolução de impressão do equipamento: **a)** desenho 2D da estrutura idealizada (medidas em milímetros); **b)** respetivo desenho 3D.

Dada a natureza do estudo, a impressão foi realizada com PLA nos dois extrusores, de cores distintas, facto que elimina a problemática da compatibilidade entre ambos e torna o processo mais ágil, acrescido do facto de ser um material pouco oneroso. No decorrer das várias impressões variou-se o diâmetro do *nozzle*, e em função desse foi-se reduzindo a secção transversal da estrutura até deixar de ser possível a distinção nítida dos dois materiais. Visando uma fácil leitura e perceção dos valores registados em cada amostra, ao extrusor 1 corresponde a geometria assinalada por A e ao extrusor 2 a geometria assinalada por B (estrutura) como é visível na Figura 40.

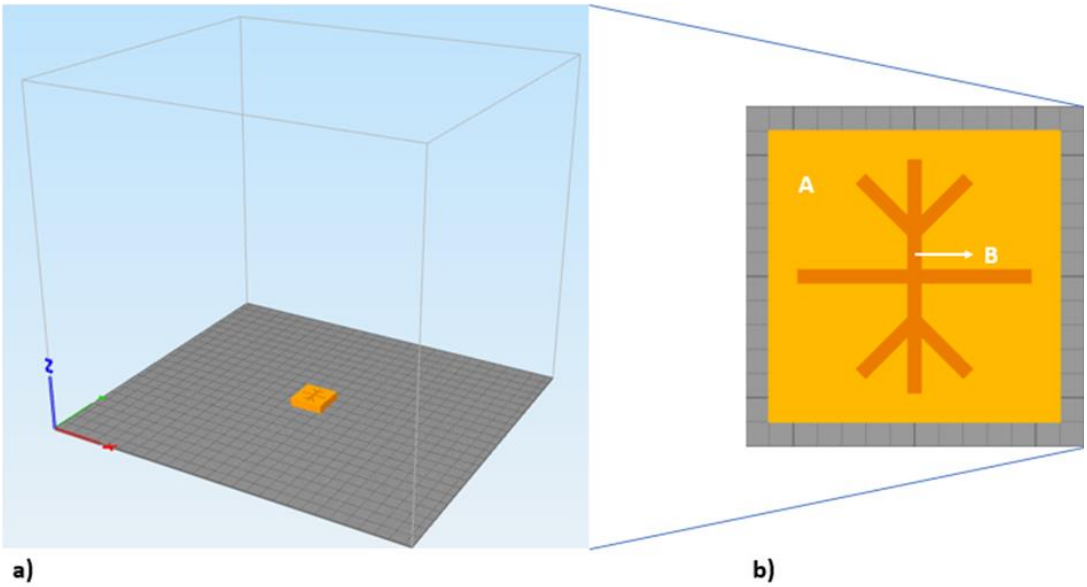

Figura 40. Teste de resolução de impressão: **a)** peça importada para o ambiente trabalho do Simplify3D**; b)** peça ampliada, onde A corresponde ao quadrado de 20x20 mm impresso pelo extrusor 1 e B representa estrutura impressa pelo extrusor 2.

Representado, na tabela 9, estão as condições testadas na resolução de impressão, com o *nozzle* de 0,4 e 0,25 mm (L representa a espessura da estrutura assinalada por B na Figura 40).

Tabela 9. Condições testadas na resolução de impressão, com nozzle 0,4 mm e 0,25 mm.

	***Nozzle* 0,4 mm**									***Nozzle* 0,25 mm**
Amostra	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
	Extrusora									
	A	**B (L=1mm)**	**A**	**B (L=0.5mm)**	**A**	**B (L=0.4mm)**	**A**	**B (L=0.3mm)**	**A**	**B (L=0.25mm)**
Diâmetro do *nozzle* (mm)	0,4		0,4		0,4		0,4		0,25	
Multiplicador de extrusão	0,9		0,9		0,9		0,9		0,95	
Largura de extrusão (mm)	0,48		0,48		0,48		0,48		0,24	
	Camadas									

Altura da primeira camada (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,12
Número de camadas sólidas superiores	3	3	3	3	3
Número de camadas sólidas inferiores	3	3	3	3	3
Número de perímetros	2	2	2	2	2
Primeira Camada					
Altura da primeira camada (%)	200	200	200	200	300
Largura da primeira camada (%)	100	100	100	100	200
Velocidade da primeira camada (%)	30	30	30	30	30
Enchimentos					
Enchimento (%)	100	100	100	100	100
Orientação do enchimento	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45	45/-45
Temperaturas					
Extrusor (°C)	220	220	220	220	220
Cama (°C)	50	50	50	50	50

Velocidade de Impressão										
Velocidade de impressão (mm/s)	35	25	30	25	25	25	25	25	15	15
Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	65		65		65		65		65	
Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3		3		3		3		3	

Como é visível na Figura 41, nas amostra 1 e 2 a distinção das zonas A e B é bastante percetível, havendo uma consonância entre o desenho idealizado e o resultado obtido. Por outro lado, na amostra 3 é já visível alguma sobreposição de camadas e, por último, na amostra 4 é clara a sobreposição total das camadas das duas zonas. Pode-se, portanto, concluir que nas amostras 3 e 4 foi ultrapassado o limite da capacidade de resolução com o *nozzle* 0,4 mm quando se igualou o valor da largura da estrutura ao diâmetro do *nozzle*. Para se obter mais rapidamente a resolução máxima, e dada a escassez de tempo, foi escolhido o *nozzle* de menor diâmetro em detrimento dos restantes e testada a situação limite em que o diâmetro do mesmo iguala a largura da estrutura. Dessa feita, foi acoplado o *nozzle* de 0,25 mm na impressora e feitas as retificações necessárias às configurações de impressão (ver tabela 9, amostra 5).

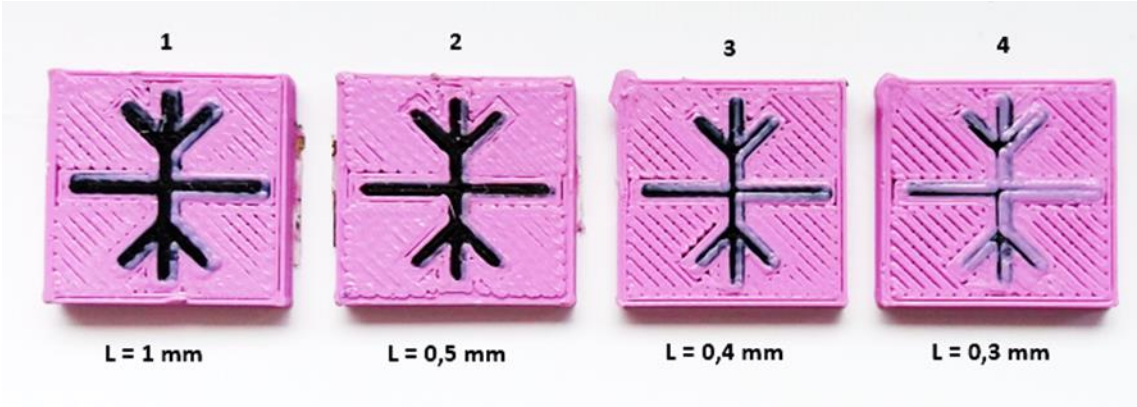

Figura 41. Amostras obtidas no processo de resolução com nozzle de 0,4 mm

Concluída a impressão foi possível verificar uma boa distinção entre as duas zonas, Figura 42, corroborando os resultados obtidos anteriormente com o *nozzle* de 0,4 mm. Pesando o facto de ser extremamente importante a minúcia no detalhe na impressão das estruturas híbridas bioinspiradas, o *nozzle* de 0,25 mm é o que reúne as melhores condições para a sua concretização. Assim sendo, este foi acoplado em definitivo à impressora 3D para posteriormente ser feita a impressão de estruturas híbridas.

Figura 42. Amostra obtida no processo de resolução com o nozzle de 0,25 mm de diâmetro.

4.2 Impressão das Estruturas Híbridas

Pelo facto de ser um processo minucioso, forçado pelas dimensões da estrutura, aliado ao facto de ser uma impressão bi-material que requer uma correta afinação do equipamento, foi feita uma nova calibração dos extrusores em relação à cama de impressão e dos mesmos entre si, para que estes imprimam na posição correta e em consonância com as delimitações da estrutura. Assegurada a correta calibração, foi importado o desenho da estrutura híbrida para o *Simplify3D*. A primeira questão a resolver foi a forma como esta iria ser posicionada na mesa de impressão sem colocar em risco a integridade do processo e da própria estrutura. O primeiro critério a ter em conta, incidiu na sua geometria, sendo rapidamente percetível que em duas das suas faces existem curvaturas e por essa mesma razão a impressão ficava comprometida com a orientação da Figura 43.

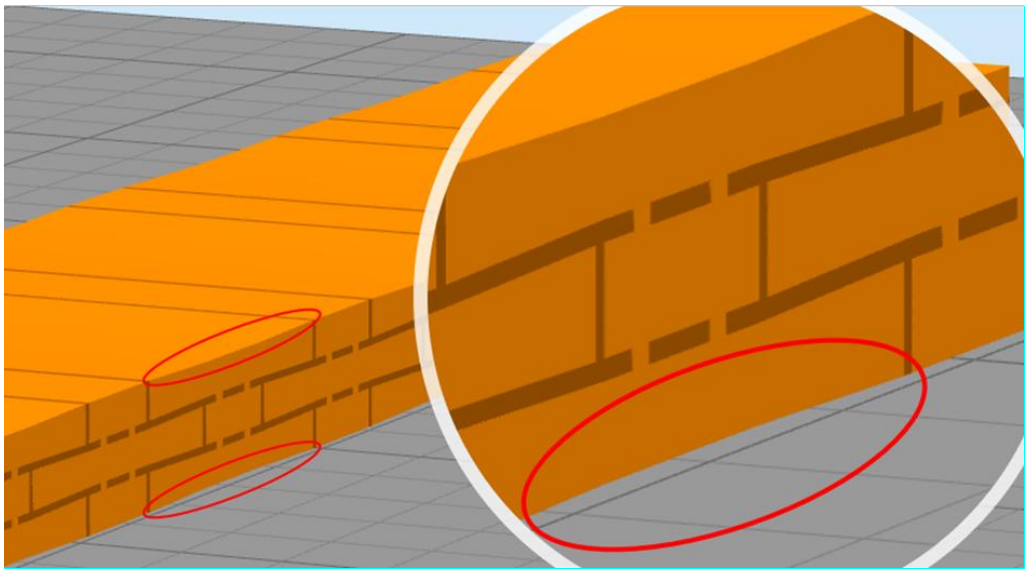

Figura 43. Tentativa número 1 de posicionamento da peça na mesa de impressão.

Numa outra tentativa, ao eliminar a dificuldade anterior, surgiu uma nova determinada pela disparidade de dimensões entre a base escolhida e altura da peça (Fig.44). É de extrema importância, na impressão de uma qualquer peça, que a base seja bem impressa e capaz de suportar toda a sua estrutura. Em suma, as dimensões da base condicionam uma boa capacidade de suporte de toda a estrutura.

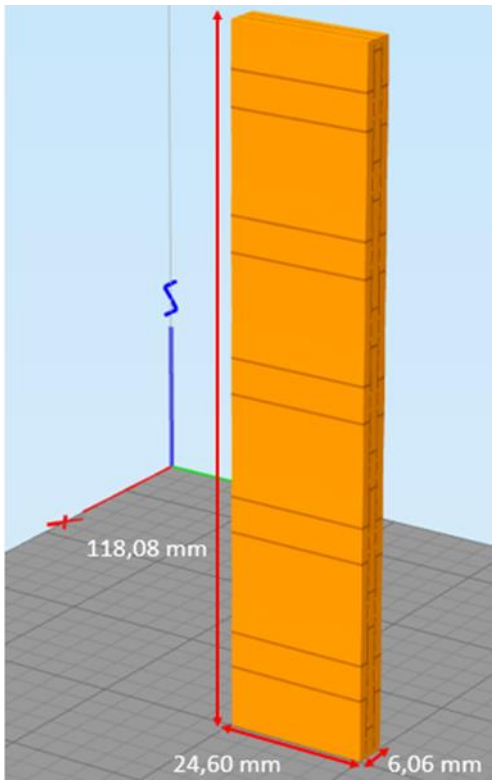

Figura 44. Tentativa número 2 de posicionamento da peça na mesa de impressão.

Por fim, foi encontrada a solução que melhor servia o propósito da impressão. Esta garante que toda a sua base assente na perfeição na mesa, existe um melhor rácio entre a base e a altura da peça, e por sua vez de entre as três hipóteses é a que reúne as melhores condições para uma melhor impressão da zona assinalada, na Figura 45, dada a sua dimensão e localização.

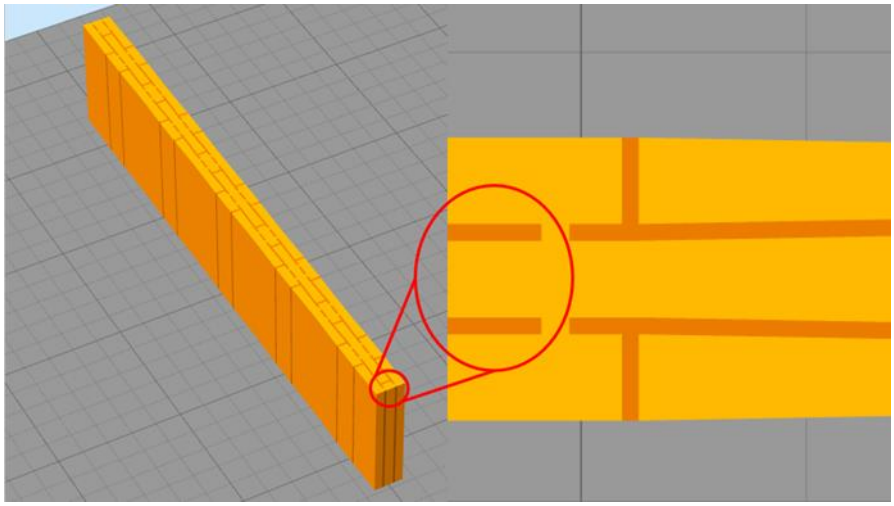

Figura 45. Tentativa número 3 de posicionamento da peça na mesa de impressão.

Decido o correto posicionamento de impressão da peça, foi realizado um estudo prévio das condições de impressão e dos possíveis problemas/ constrangimentos que pudessem vir a surgir. Por forma a tornar o estudo mais simples e rápido, foi redesenhada a estrutura encurtando-a no seu comprimento e altura, e replicado o padrão ao longo da sua largura para poder estudar a capacidade da impressora em reproduzir a geometria da estrutura híbrida complexa (Fig.47). Antes da impressão, o filamento de Nylon foi seco numa estufa por um período de 4 horas, a uma temperatura de 80°C. Terminado o período de secagem, o material foi prontamente colocado na caixa idealizada e concebida para o poder acondicionar e garantir a sua preservação e isolamento durante todo o processo de impressão. De seguida aqueceu-se a cama de impressão e os dois extrusores, equipados com dois *nozzles* de 0,25 mm. Os filamentos de Nylon e Ninjaflex foram introduzidos nos respetivos extrusores, inseridas as condições de impressão (tabela 9, *nozzle* 0,25 mm) no *Simplify3D* e dada ordem de impressão. Para uma garantia de que o material flua adequadamente no arranque da impressão, foi acionada uma opção no software que obriga o extrusor a imprimir, em primeiro lugar, um número de perímetros (definido pelo utilizador), em torno da área destinada ao provete. Não obstante, tratando-se de uma impressão bi-material, esta implica uma constante troca entre extrusores pelo que é necessário usar a opção "*Prime Pillar*" que obriga cada extrusor a fazer primeiro uma "pré-impressão", garantindo por sua vez uma boa fluidez do material na altura de imprimir o provete (Fig.46).

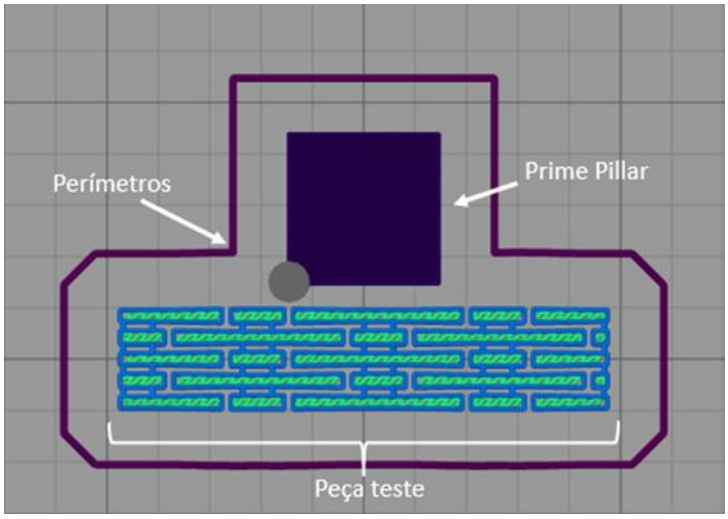

Figura 46. Esquema de impressão "Peça teste".

Garantidas as condições, foi feita, com sucesso, a impressão (Fig.47).

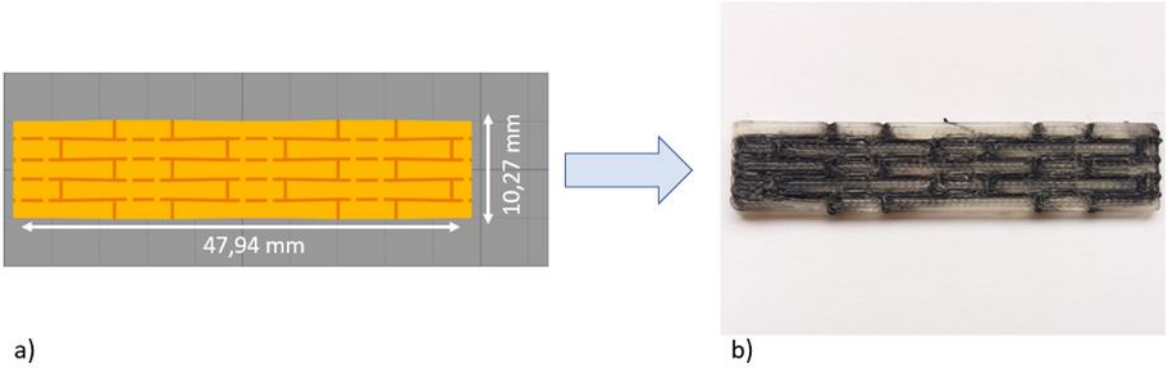

Figura 47. Estrutura bioinspirada: **a)** peça com padrão replicado (Simplify3D); **b)** peça impressa com o método bi-material com um nozzle de 0,25 mm.

A estrutura apresentou uma boa coesão entre camadas e nas diferentes interfaces entre os dois materiais (Fig.48).

Figura 48. Vista parcial da estrutura obtida através da lupa do microscópio.

A visualização da estrutura impressa através do Microscópio de Transmissão Olympus, em reflecção, com ampliação em 0,67 x 1,67, acoplado a uma câmara LEICA permitiu comprovar a ausência de vazios e observar uma aparente boa adesão entre os dois materiais. Para poder realizar as medições pretendidas, é necessário através do software colocar uma linha horizontal que irá ditar a distinção entre secções e posteriormente são traçadas várias perpendiculares obtendo desse modo os valores pretendidos. Limitados pela difícil distinção,

entre as interfaces dos dois materiais, estará sempre associado algum erro às mesmas. Nas zonas impressas com o Ninjaflex (preto), são feitas leituras entre os 700 e 900 µm, o que dista bastante do valor de 360 µm do desenho inicial. Nas zonas impressas com o Nylon (brancas) observam-se valores a rondar os 1500 µm, valor próximo dos 1850 µm definidos no desenho, como é possível visualizar na Figura 49.

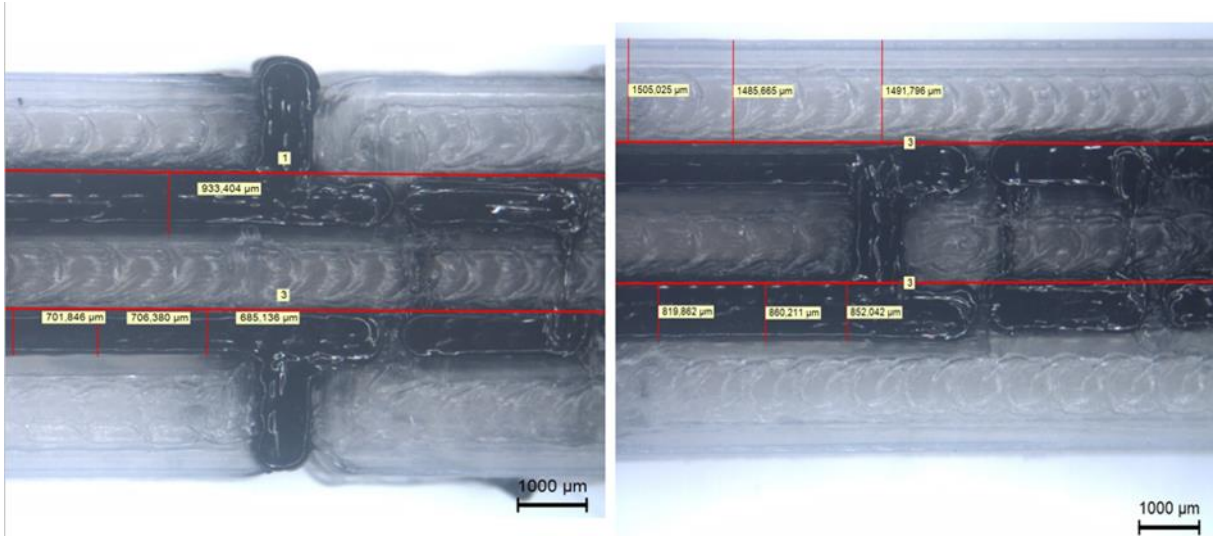

Figura 49. Medições realizadas às secções da peça impressa.

Na origem dessas diferenças de valores, poderá estar a compactação a que as camadas são sujeitas através da deposição de novas camadas. Quando o *nozzle* deposita uma nova camada, irá por força dessa ação compactar a anterior, surtindo maior ou menor compactação na anterior dependendo da sua temperatura. Caso a camada inferior se encontre a uma temperatura substancialmente mais baixa, estará menos suscetível a deformar-se, não sofrendo tanto esse efeito. Por outro lado, no caso de as diferenças de temperaturas entre ambas não ser significativa, poderá dar-se o caso de essa compactação ser mais acentuada, influenciando dessa forma a largura das regiões medidas ao microscópio. O facto de as zonas de Nylon apresentarem valores mais próximos do desenho inicial poderá estar relacionado com o facto de este ser um material rígido e como tal menos suscetível à deformação por compactação.

Tendo como objetivo final, testar os provetes (estruturas híbridas) com recurso a testes mecânicos, foram impressos 5 provetes híbridos e 5 provetes usando unicamente o material rígido – Nylon (tabela 10). No caso dos últimos, o método de impressão manter-se-á idêntico à impressão bi-material, mas em ambos os extrusores será usado o material rígido, mantendo assim a estrutura igual para os dois tipos de provetes.

Tabela 10. Condições de impressão dos provetes híbridos (Nylon/Ninjaflex) e provetes de Nylon.

Amostra	Provetes Híbridos		Provetes Nylon	
Extrusora				
	Extrusor 1 Nylon	Extrusor 2 Ninjaflex	Extrusor 1 Nylon	Extrusor 2 Nylon
Diâmetro do *nozzle* (mm)	0,25		0,25	
Multiplicador de extrusão	1,10		1,10	
Largura de extrusão (mm)	0,24		0,24	
Camadas				
Altura da primeira camada (mm)	0,12		0,12	
Número de camadas sólidas superiores	3		3	
Número de camadas sólidas inferiores	3		3	
Número de perímetros	2		2	
Primeira Camada				
Altura da primeira camada (%)	300		300	
Largura da primeira camada (%)	210		210	
Velocidade da primeira camada (%)	30		30	
Enchimento				
Enchimento (%)	100		100	
Orientação do enchimento	45/-45		45/-45	
Temperaturas				
Extrusor (°C)	235	225	235	235
Cama (°C)	70		70	
Velocidade de Impressão				
Velocidade de impressão (mm/s)	15	10	15	15

Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	65	65
Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3	3

Este processo de impressão bi-material, de uma estrutura de pequenas dimensões, implicou o uso de velocidades bastantes baixas, sendo necessárias 13 horas para a impressão de cada um dos provetes híbridos. Os provetes híbridos foram os primeiros a serem impressos, verificando-se algum tempo após o início do processo, a sua perda de adesão à cama de impressão. A contração do material semi-cristalino (Nylon) e o longo período de impressão poderão estar na origem do problema. Através do auxílio dado no site do *Simplify3D*, é dado como recurso colocar cola líquida na mesa promovendo uma maior adesão das peças impressas. Assim, procedeu-se à deposição de fita-cola de papel, na zona de impressão, e posteriormente aplicou-se alguma cola líquida sobre a mesma. Retomadas as impressões, foram visíveis melhorias substanciais na sua adesão, sendo de registar a impossibilidade de concluir o processo de impressão até ao seu final, motivado por algumas sucessivas avarias por parte do equipamento. Colmatado o período de reparação, foi equacionada a hipótese de reduzir a altura da peça para metade, o que por sua vez, permitiria baixar o tempo de impressão em metade e assim possibilitar a impressão de dois provetes por dia. Assim sendo, a peça que inicialmente tinha uma altura de 24,60 mm passou a ter uma altura de 12,30 mm.

Estipuladas as novas alterações, foram retomadas as impressões e após o primeiro provete impresso foi visível um empeno substancial nas suas extremidades. Numa tentativa de poder atenuar da melhor forma os empenos sem colocar em risco o provete, foram adicionadas pequenas estruturas de suporte, junto da base, com o propósito de aumentar e melhorar a sua área de contacto com a mesa (Fig.50). Após impressão, estas foram removidas do provete.

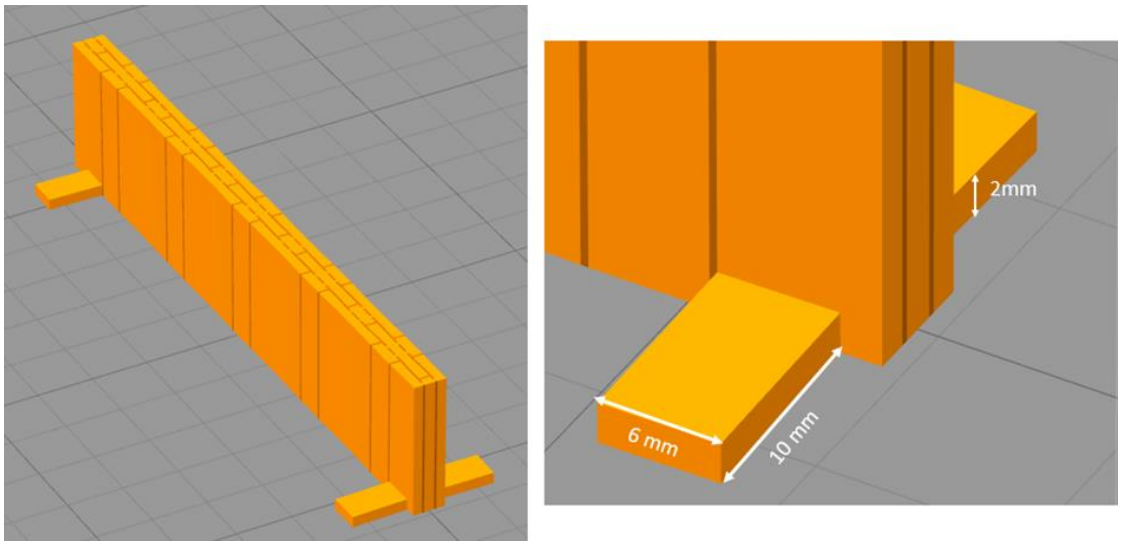

Figura 50. Peça com suporte para promover o aumento da área de contacto com a mesa.

Nestas condições, foi colocada novamente a cola líquida sobre a fita cola de papel e impresso o provete, ilustrado na Figura 51.

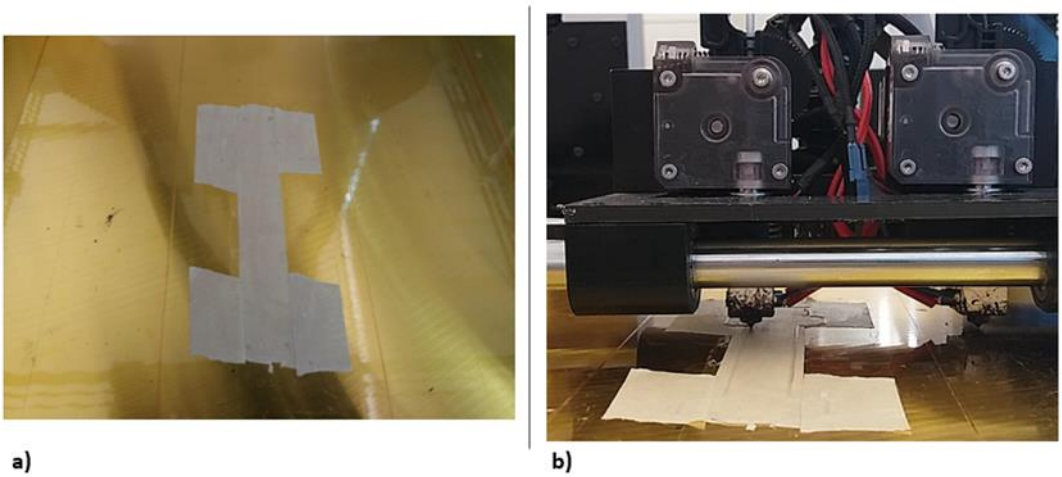

Figura 51. a) fita de papel colada na mesa de impressão onde posteriormente é colocada cola líquida; **b)** primeiras camadas a serem impressas sobre a fita de papel.

Impressos os dois primeiros milímetros do provete, as estruturas de suporte responsáveis pelo aumento da área de contacto estão completas, e sobre elas foi colocada uma nova camada de fita-cola, reforçando assim a sua adesão à mesa (Fig.52).

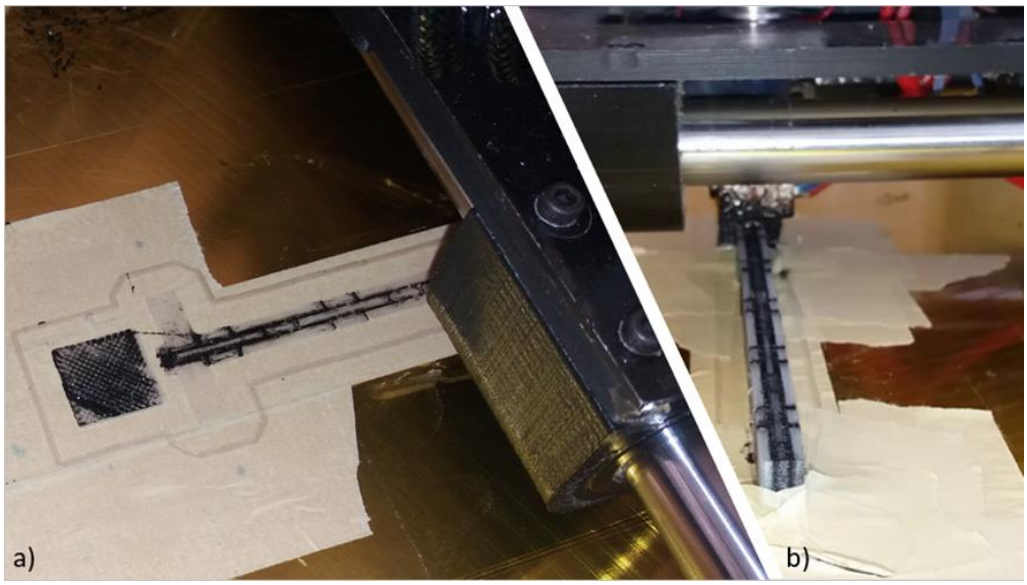

Figura 52. a) primeiras camadas impressas do provete híbrido; **b)** provete em estado avançado de impressão reforçado com fita-cola de papel nos suportes existentes nas suas extremidades.

Concluídas as impressões dos cinco provetes híbridos foram visíveis, apesar das diversas tentativas, empenos nas suas extremidades. Os cinco provetes de Nylon, Figura 53, foram impressos nas mesmas condições dos híbridos e apresentaram, igualmente, empenos nas suas extremidades.

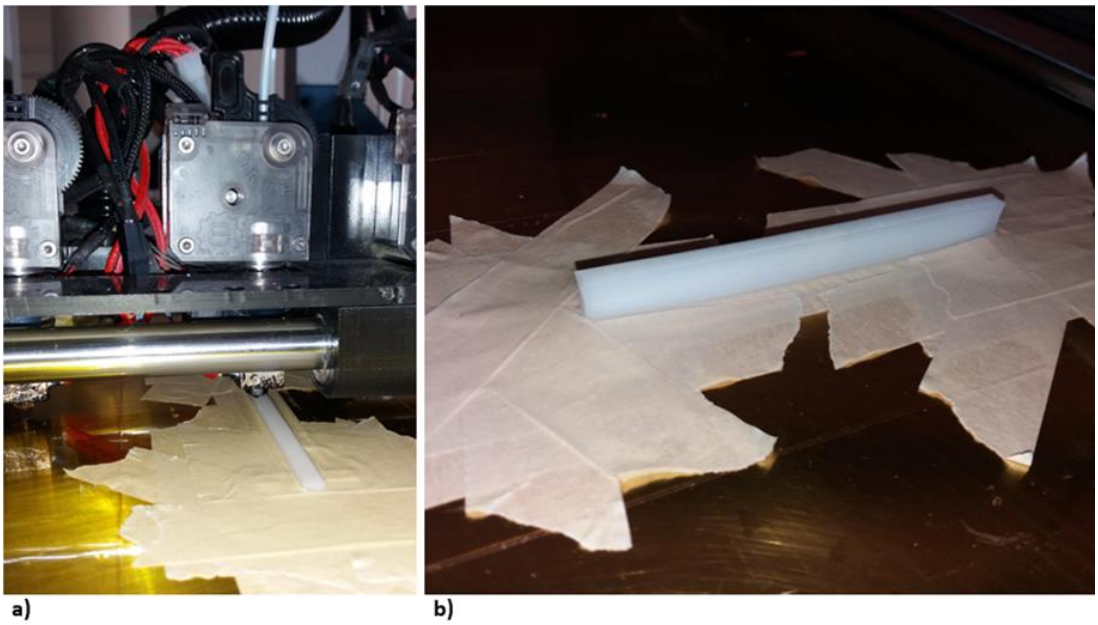

Figura 53. a) processo de impressão de um provete de Nylon; **b)** provete de Nylon impresso.

Numa análise feita a olho nu aos provetes híbridos, foi observado um bom acabamento superficial e uma aparente boa coesão nas várias interfaces dos dois materiais. Os provetes impressos unicamente em Nylon, aparentavam também um bom acabamento superficial e uma boa consistência (Fig.54 e 55).

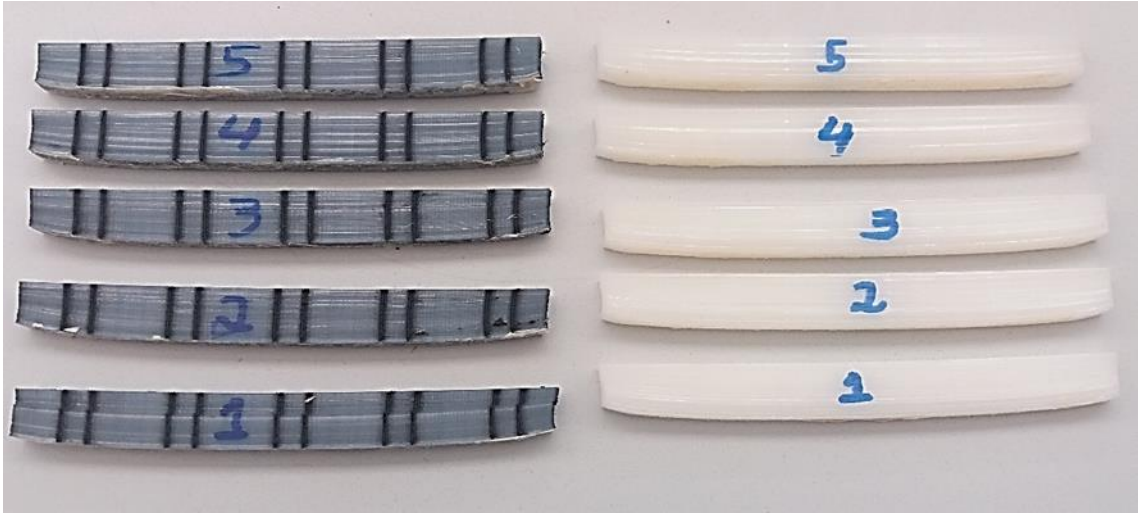

Figura 54. Provetes híbridos e Nylon impressos.

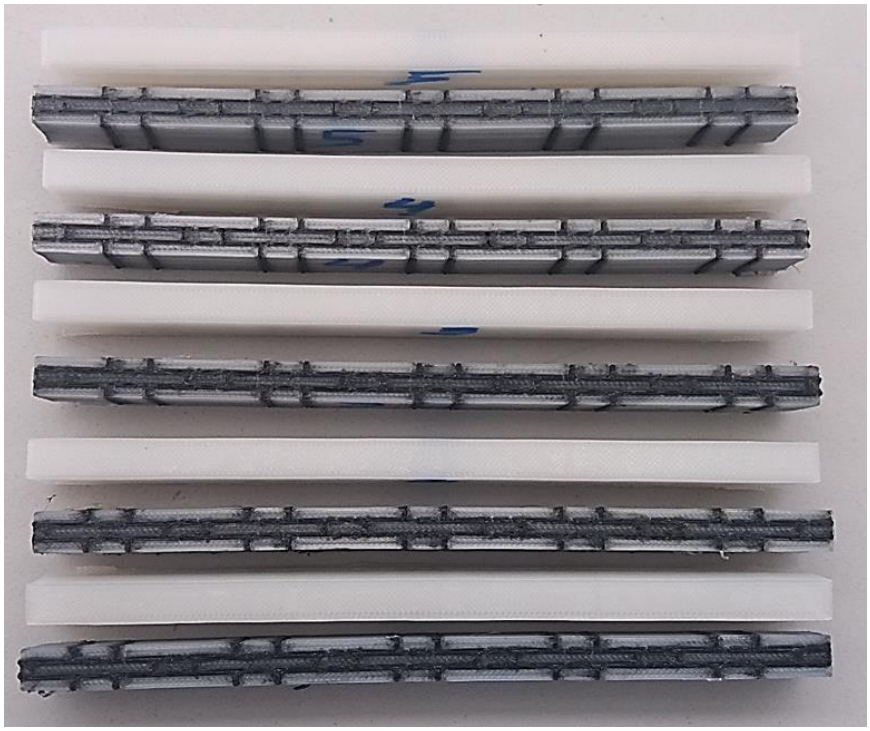

Figura 55. Provetes impressos vistos de cima.

4.3 Ensaios Mecânicos

- **Condições de Ensaio**

  - **Ensaio de Flexão**

O ensaio de flexão permite determinar as propriedades de rigidez e resistência à flexão. Para tal, é colocada uma barra de secção transversal retangular, entre dois apoios, onde por ação de um punção é aplicada uma força no centro da mesma. A força aplicada e a deformação resultante no centro da barra são medidas e registadas até que ocorra rotura em qualquer uma das superfícies externas ou seja atingido algum valor de deformação pré-definido.

Com os dados obtidos, força aplicada e deslocamento resultante, é possível obter um gráfico tensão [MPa] - deformação [%]. Para calcular os valores da tensão e deformação, usaram-se as seguintes equações:

$$\boldsymbol{\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}} \quad (5)$$

Onde:

σ_f = tensão de flexão na superfície oposta ao carregamento, MPa;

P = carga num determinado ponto na curva de carga-deflexão, N;

L = distância entre apoios, mm;

b = largura do corpo de prova, mm;

d = espessura do corpo de prova, mm;

$$\boldsymbol{\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}} \quad (6)$$

Onde:

Ɛ = deformação sob flexão, mm/mm;

D = deflexão no centro do corpo de prova, mm;

L = distância entre apoios, mm;

d = espessura do corpo de prova, mm;

O procedimento experimental foi realizado recorrendo a uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 5969, tendo sido testados 5 provetes de cada tipo. Os parâmetros usados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros usados no ensaio de flexão

Velocidade de deslocamento (mm/min)	3
Espaçamento entre os pontos de apoio (mm)	98,4

Na Figura 56, é ilustrado o equipamento utilizado no ensaio de flexão e uma das amostras ensaiadas.

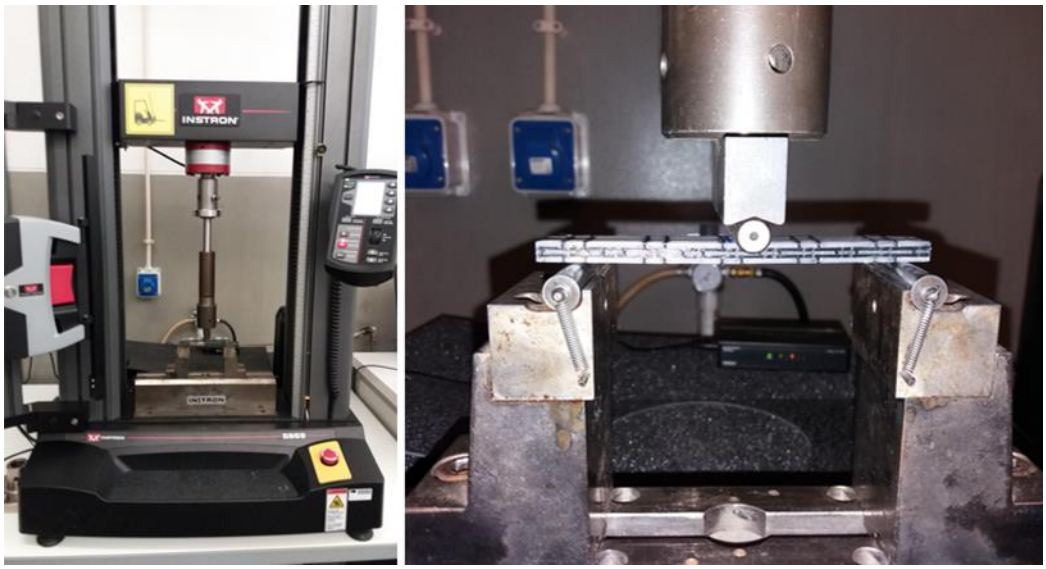

Figura 56. Equipamento utilizado nos ensaios de flexão.

- **Ensaio de Impacto**

A resistência ao impacto de um material é a energia necessária à sua fratura, por unidade de área da sua secção transversal. De uma outra forma, é a energia que o material consegue

absorver antes de fraturar, dependendo esta da temperatura, humidade, características morfológicas e defeitos existentes na peça. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D 256-04 e o equipamento de impacto utilizado foi o Ceast 6545. Auxiliado de um micrótomo CEAST-SPA Touro foi criado um entalhe de 2,54 mm nos provetes, definindo desta feita um ponto para início da rotura e diminuindo a energia necessária à sua fratura. No conjunto dos ensaios realizados aos provetes, a capacidade do pêndulo foi definida para 4 J e a resistência do ar lida foi de 0,08 J.

Na Figura 57, é ilustrado o equipamento utilizado nos ensaios de impacto e uma das amostras ensaiadas. Na zona circundada a vermelho, encontra-se assinalado o entalhe feito no provete.

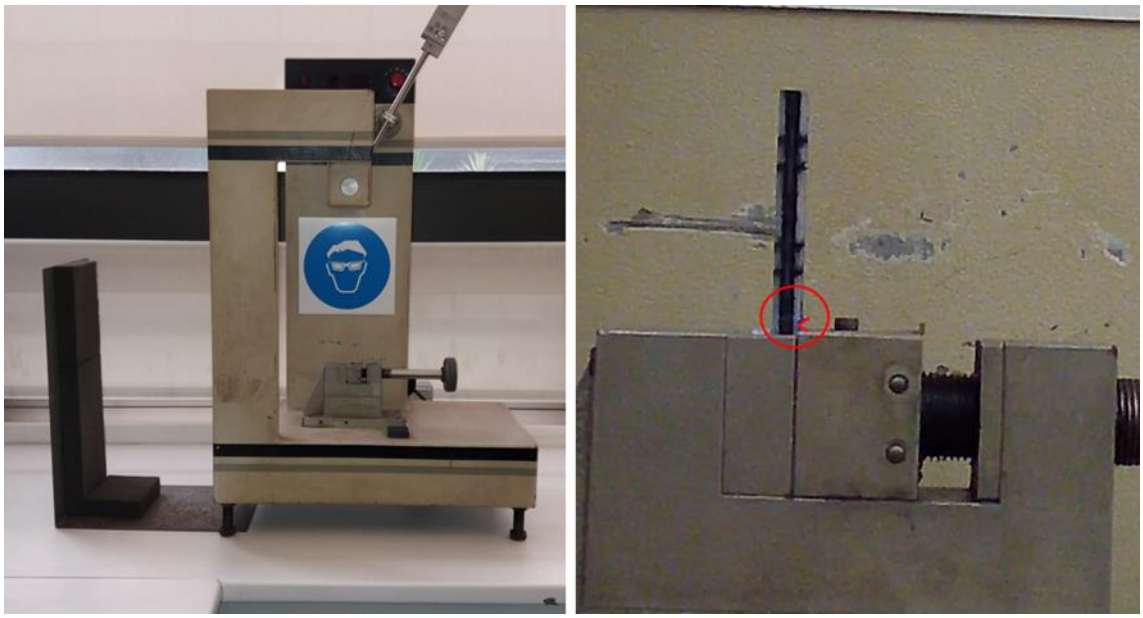

Figura 57. Equipamento utilizado nos ensaios de Impacto.

4.4 Análise Global

Os ensaios mecânicos foram realizados para se poder aferir a coesão entre camadas e a compatibilidade entre os materiais impressos e, objetivo final, mostrar que a estrutura híbrida tem melhor desempenho mecânico que um provete produzido unicamente com o material de maior resistência (o Nylon, neste caso). As diversas amostras, foram sujeitas a condições extremas nos diferentes ensaios, sendo notável a coesão entre camadas e materiais, creditando todo o processo de seleção de materiais e adequação das condições de impressão 3D. O ensaio de flexão foi inicialmente realizado a uma velocidade baixa de 3 mm/min, adequada a este tipo de estruturas, tendo sido aumentada progressivamente até aos 600 mm/min, limite máximo do equipamento. Os provetes ensaiados, um híbrido e um de Nylon, após terem sofrido um teste intensivo a diversas velocidades apresentaram uma excelente coesão entre camadas. De realçar que após o ensaio à velocidade máxima de 600 mm/min e com uma diminuição da distância entre os apoios para metade, por forma a intensificar ainda mais os esforços, ambas apresentaram alguns danos estruturais sem comprometer a coesão entre camadas (Fig.58). Atendendo a estes resultados e à exiguidade do número de provetes, os restantes quatro de Nylon e híbridos foram salvaguardados para serem testados no ensaio de impacto.

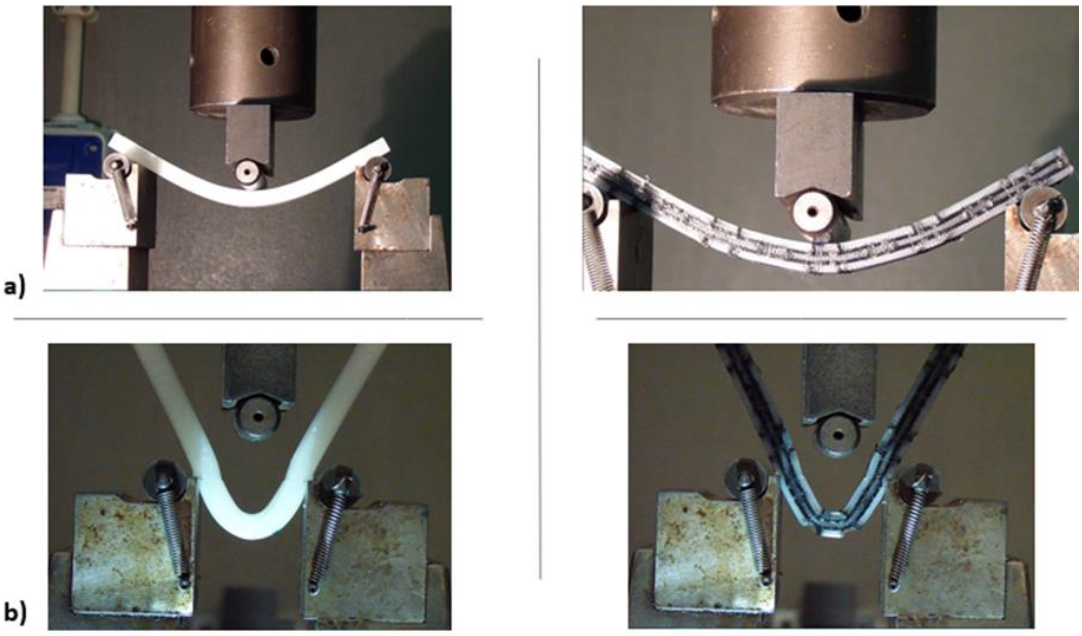

Figura 58. a) Ensaios realizados à velocidade de 3mm/s; **b)** Ensaios realizados à velocidade de 600mm/min.

Atendendo aos excelentes resultados obtidos nos ensaios de flexão, os restantes provetes foram acondicionados, por um período de 48 horas, a uma temperatura de -20°C, numa arca frigorífica, de modo a torná-los mais frágeis. Condicionado pela distância existente entre a arca frigorífica e o laboratório de ensaios, os provetes foram levados um a um dentro de uma mala térmica com dois acumuladores, por forma a poder manter uma temperatura o mais próxima possível dos -20°C. Os quatro provetes de cada condição impressa, foram então testados, não se tendo verificado a sua rotura por impacto (Fig.59). Para além disso, a coesão entre camadas manteve-se intacta.

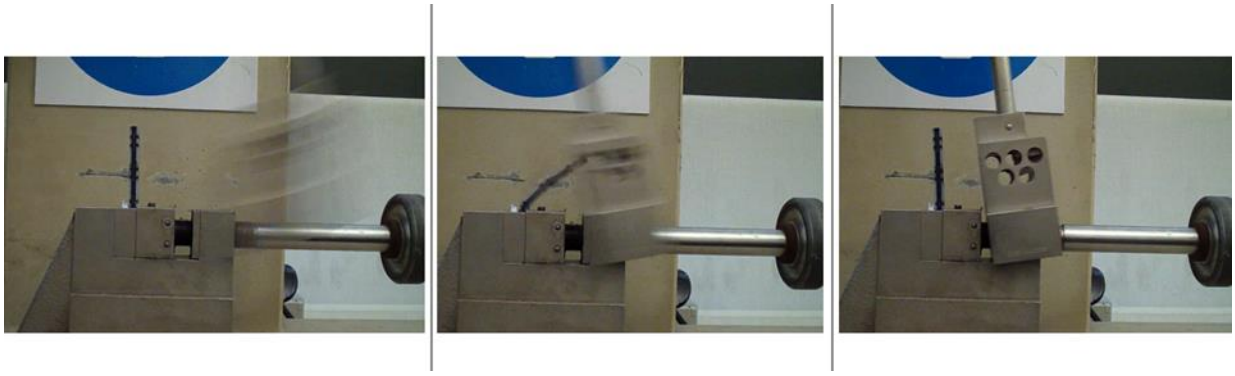

Figura 59. Ensaio de impacto de um provete híbrido.

Findados os ensaios mecânicos, e mesmo em condições extremas, é notória a coesão entre camadas em todas as amostras. Os resultados são prometedores, validando as opções feitas, mas não permitem comparar o desempenho das estruturas híbridas com o dos provetes constituídos apenas por Nylon.

5. CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como principal intento, face ao avanço tecnológico da técnica de impressão 3D FFF, imprimir uma estrutura híbrida bioinspirada e avaliar o seu desempenho mecânico.

Como ponto de partida, foi realizada uma pesquisa bibliográfica incidindo o foco no processo de impressão 3D FFF, nos seus diversos parâmetros e na forma como estes afetam as caraterísticas das impressões. Por conseguinte, a pesquisa foi direcionada para a capacidade de imprimir peças multimaterial bioinspiradas, aliando os milhões de anos de evolução e aperfeiçoamento por parte da natureza, à sua incrível liberdade geométrica.

Perante o enorme desafio de realizar uma impressão com dois materiais diferentes, o primeiro passo foi dado no âmbito de apurar, mediante um grupo de materiais pré-selecionados, uma possível compatibilidade/soldabilidade entre ambos. Através do processo de soldadura topo-a-topo, foi possível testar as diversas combinações possíveis entre os dois materiais rígidos e os quatro materiais flexíveis. Encontradas as combinações de pares de material rígido/flexível com maior potencial, as mesmas foram replicadas pelo processo de impressão 3D com sucesso, validando desta feita o estudo de compatibilidade realizado com o processo de soldadura.

Mediante o comportamento dos pares de materiais no decorrer do processo de impressão e os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, a escolha recaiu sobre o par Nylon-Ninjaflex. Escolhido o par a ser impresso, impulsionado pela minucia exigida na impressão da estrutura híbrida, foi realizado um estudo que permitiu apurar a resolução possível do equipamento de impressão e daí definir os parâmetros adequados à impressão da estrutura.

Definidos os parâmetros de impressão, foram impressos os provetes com as estruturas para teste de resolução. Todo o processo que antecedeu a impressão dos provetes híbridos, demonstrou-se complexo e difícil com o surgimento de uma série de dificuldades, nomeadamente:

I. dificuldades relacionadas com a calibração entre a mesa de impressão e os extrusores;
II. dificuldades em garantir a calibração minuciosa entre os dois extrusores, por forma a imprimirem corretamente a estrutura híbrida;
III. problemas de adesão das estruturas à mesa de impressão;
IV. avarias sucessivas por parte do equipamento.

Superadas as dificuldades acima citadas, as estruturas impressas foram sujeitas a ensaios mecânicos que permitissem atestar a coesão estrutural e a compatibilidade entre os materiais e o seu desempenho mecânico. O primeiro ensaio realizado foi o de flexão, onde uma amostra

híbrida e outra de Nylon foram testadas sucessivamente a diversas velocidades, até ao limite máximo permitido pelo equipamento. Após vários ensaios foi notória a coesão entre camadas e entre os dois diferentes materiais, no caso do provete híbrido.

Posteriormente, as restantes amostras híbridas e de Nylon foram sujeitas a condições extremas e testadas num ensaio de impacto, onde novamente foi visível a coesão entre as diversas camadas das estruturas e entre os dois diferentes materiais nas estruturas híbridas. No entanto, dado que nunca se conseguiu levar à rotura nenhum dos provetes, não foi possível perceber se a estrutura híbrida bioinspirada tem ou não melhor desempenho que os provetes produzidos com o material mais resistente (Nylon).

Percorrido todo o processo de delineação e execução, perante os resultados obtidos é possível afirmar que os mesmos são bastante animadores e satisfatórios. Após um percurso tortuoso, onde foi necessário empenho, paciência e astúcia de modo a ultrapassar todas as dificuldades, foi possível conceber uma estrutura híbrida bastante coesa e resistente.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para possíveis futuras abordagens sobre o tema da dissertação, ficam aqui registadas algumas sugestões:

- Seria interessante a criação de um protótipo de uma máquina de soldadura topo-a-topo adequado às dimensões dos filamentos, que permita a sua junção de uma forma rigorosa e sem oscilações;
- Sobre a mesma, durante a fase de aquecimento, criar a possibilidade de ter duas placas de aquecimento, de modo a poder regular a temperatura de cada uma delas em função das temperaturas características de cada material;
- Alargar o leque de materiais em estudo;
- Utilização de uma impressora com câmara fechada, permitindo um maior controlo e rigor da temperatura ambiente onde a peça está a ser impressa, reduzindo possíveis problemas de adesão das peças e empenos.

REFERÊNCIAS

[1] G. X. Gu, I. Su, S. Sharma, J. L. Voros, Z. Qin, and M. J. Buehler, "Three-Dimensional-Printing of Bio-Inspired Composites," *J. Biomech Eng*, vol. 138, pp. 1–16, 2016.

[2] A. R. Studart, "Towards High-Performance Bioinspired Composites," *Adv. Mater.*, vol. 24, pp. 1–21, 2012.

[3] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, "Material issues in additive manufacturing : A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 185–200, 2017.

[4] C. Zeiss, I. Messtechnik, and C. Z. Straße, "Additive Manufacturing – a new approach for individualized optical shape metrology," vol. 9525, pp. 1–10, 2015.

[5] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, 2015.

[6] T. T. Wohlers, T. Caffrey, and R. I. Campbell, *Wohlers report 2016 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report*. 2016.

[7] A. Bandyopadhyay and S. Bose, *Additive Manufacturing*. Florida: CRC Press, 2015.

[8] G. Villar, A. D. Graham, and H. Bayley, "A Tissue-Like Printed Material," no. April, pp. 48–53, 2013.

[9] M. Stern *et al.*, "Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass," vol. 2, no. 3, pp. 92–105, 2015.

[10] "Additive Manufacturing Tackling Standards & Certification." [Online]. Available: https://knowledge.ulprospector.com/3740/pe-additive-manufacturing-tackling-standards-certification/. [Accessed: 28-Sep-2018].

[11] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O. Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing : scientific and technological challenges , market uptake and opportunities," *Biochem. Pharmacol.*, vol. 21, pp. 1–16, 2017.

[12] Z. Quan *et al.*, "Additive manufacturing of multi- directional preforms for composites : opportunities and challenges," *Biochem. Pharmacol.*, vol. 18, no. 9, pp. 503–512, 2015.

[13] "Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda," 2014. [Online]. Available: https://www.rm-platform.com/linkdoc/AM SRA - February 2014.pdf. [Accessed: 18-Jul-2018].

[14] A. C. De Leon, Q. Chen, N. B. Palaganas, J. O. Pala-, J. Manapat, and R. C. Advincula, "High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications,"

REACT, 2016.

[15] B. Wendel, D. Rietzel, F. Ku, R. Feulner, and E. Schmachtenberg, “Additive Processing of Polymers,” vol. 293, pp. 799–809, 2008.

[16] “Metal Additive Manufacturing/3D Printing: An Introduction.” [Online]. Available: http://www.metalam.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/. [Accessed: 17-Oct-2018].

[17] Y. Meir and E. Jerby, “The Localized Microwave-Heating (LMH) Paradigm – Theory , Experiments , and Applications,” pp. 131–138, 2012.

[18] D. L. Bourell, “Perspectives on Additive Manufacturing,” no. January, pp. 1–18, 2016.

[19] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing : technology , applications and research needs,” vol. 8, no. 3, pp. 215–243, 2013.

[20] M. Centre, U. Tun, and H. Onn, “ELEMENTS AND MATERIALS IMPROVE THE FDM PRODUCTS : A REVIEW,” vol. 16, pp. 33–51, 2016.

[21] M. Engineering *et al.*, “Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication,” *Plast. Rubber Compos.*, vol. 47, pp. 1–8, 2017.

[22] K. Lee, H. Park, J. Kim, and D. Chun, “Applied Surface Science Fabrication of a superhydrophobic surface using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with poly lactic acid (PLA) filament and dip coating with silica nanoparticles,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 467–468, no. May 2018, pp. 979–991, 2019.

[23] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, “Extrusion-Based Systems,” pp. 143–169, 2010.

[24] M. Engineering, K. U. Leuven, E. Technology, C. De Nayer, and K. U. Leuven, “A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing,” pp. 3–6, 2013.

[25] E. A. Manufacturing, M. Spoerk, J. G. Id, C. Lichal, and H. Cajner, “Optimisation of the Adhesion of Polypropylene-Based Materials during,” vol. 10, pp. 1–16, 2018.

[26] B. N. Turner and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes : II . Materials , dimensional accuracy , and surface roughness,” vol. 3, no. February 2013, pp. 250–261, 2015.

[27] K. Elkins, H. Nordby, C. Janak, R. W. G. Iv, J. H. Bhn, and D. G. Baird, “Soft Elastomers for Fused Deposition Modeling _ t,” pp. 441–448, 1997.

[28] L. E. Murr *et al.*, “• Invited Review Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–14, 2012.

[29] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,”

Mater. Des., vol. 58, pp. 242–246, 2014.

[30] O. Ahmed, S. Hasan, and J. Lal, "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion," *MEASUREMENT*, vol. 81, pp. 174–196, 2016.

[31] M. Domingo-espin, J. M. Puigoriol-forcada, A. Garcia-granada, J. Llumà, S. Borros, and G. Reyes, "Materials & Design Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 670–677, 2015.

[32] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, and C. Pappalettere, "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory," *JMADE*, vol. 90, pp. 453–458, 2016.

[33] E. Ulu, E. Korkmaz, K. Yay, O. B. Ozdoganlar, and L. B. Kara, "Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization," vol. 137, no. November 2015, pp. 1–9, 2019.

[34] A. Bellini, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," vol. 9, no. 4, pp. 252–264, 2003.

[35] B. Caulfield, P. E. Mchugh, and S. Lohfeld, "Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process," vol. 182, pp. 477–488, 2007.

[36] A. N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and M. Joshua, "Tensile Strength of Commercial Polymer Materials for Fused Filament Fabrication 3D Printing," *Addit. Manuf.*, no. 2010, 2017.

[37] J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, "Materials and Manufacturing Processes Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples," no. July 2014, pp. 37–41.

[38] S. Ahn, M. Montero, and P. K. Wright, *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. 2012.

[39] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, "Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling," *Int. J. Fract.*, vol. 210, 2017.

[40] S. H. Huang, P. Liu, and A. Mokasdar, "Additive manufacturing and its societal impact : a literature review," vol. 67, pp. 1191–1203, 2013.

[41] W. Gao *et al.*, "Computer-Aided Design The status , challenges , and future of additive manufacturing in engineering," *Comput. Des.*, vol. 69, pp. 65–89, 2015.

[42] A. Fellow, “The New Trends in Next Generation Biomimetics Material Technology : Learning from Biodiversity,” 2008.

[43] E. Lurie-luke, “Product and technology innovation : What can biomimicry inspire ?,” vol. 32, pp. 1494–1496, 2014.

[44] M. A. Meyers, J. McKittrick, and P.-Y. Chen, “Structural Biological Materials: Critical Mechanics-Materials Connections,” vol. 339, no. 6121, pp. 773–779, 2013.

[45] J. D. Currey, “THE DESIGN OF MINERALISED HARD TISSUES FOR THEIR MECHANICAL FUNCTIONS,” vol. 3294, pp. 3285–3294, 1999.

[46] J. D. Currey, P. Zioupos, and P. Davies, “Mechanical properties of nacre and highly mineralized bone,” no. May 2000, pp. 107–112, 2001.

[47] R. Studart, “Chem Soc Rev Additive manufacturing of biologically- inspired materials,” vol. 45, no. 2, pp. 359–376, 2016.

[48] V. Kumar, S. Rajagopalan, M. Cutkosky, and D. Dutta, “Representation and Processing of Heterogeneous Objects for Solid Freeform Fabrication,” pp. 1–21, 1998.

[49] R. F. Gibson, E. O. Ayorinde, and Y. Wen, “SCIENCE AND Vibrations of carbon nanotubes and their composites : A review,” vol. 67, pp. 1–28, 2007.

[50] F. Barthelat, “Nacre from mollusk shells : a model for high-performance structural materials,” vol. 5, no. 3, 2010.

[51] Q. Chen and N. M. Pugno, “Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials : A review $,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 19, pp. 3–33, 2013.

[52] “Materials Genome Initiative for Global Competitiveness,” no. June, 2011.

[53] W. Bae, H. N. Kim, D. Kim, S. Park, and H. E. Jeong, “25th Anniversary Article : Scalable Multiscale Patterned Structures Inspired by Nature : the Role of Hierarchy,” pp. 675–700, 2014.

[54] A. Bandyopadhyay and B. Heer, “Materials Science & Engineering R Additive manufacturing of multi-material structures,” *Mater. Sci. Eng. R*, vol. 129, no. April, pp. 1–16, 2018.

[55] P. Taylor, “Virtual and Physical Prototyping,” no. October 2014, pp. 37–41, 2013.

[56] A. Gómez, “ScienceDirect ScienceDirect Development of a multi-material additive manufacturing process for Development of a multi-material additive manufacturing process for electronic devices Costing models for capacity optimization in Industry,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 746–753, 2017.

[57] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and

challenges," *Compos. Part B*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018.

[58] G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala, and W. Y. Yeong, "Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite," vol. 1800271, pp. 1–22, 2018.

[59] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, and N. Jayanth, "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process," vol. 2759, 2017.

[60] H. A. Pierson *et al.*, "Mechanical Properties of Printed Epoxy-Carbon Fiber Composites," no. March, 2019.

[61] C. Bellehumeur and P. E. E-mail, "Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process," vol. 6, no. 2, pp. 170–178, 2004.

[62] J. E. Seppala and K. D. Migler, "Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, 2016.

[63] J. Yin, C. Lu, J. Fu, Y. Huang, and Y. Zheng, "PT," *Mater. Des.*, vol. 150, 2018.

[64] R. P. Wool, B.-L. YUAN, and 0. J. MCGAREL, "Welding of Polymer Interfaces," vol. 29, no. 19, pp. 1340–1367, 1989.

[65] C. Mcilroy and P. D. Olmsted, "Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing," *Polymer (Guildf).*, vol. 123, pp. 376–391, 2017.

[66] A. C. Abbott, G. P. Tandon, R. L. Bradford, H. Koerner, and J. W. Baur, "Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication," *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 29–38, 2018.

[67] N. Aliheidari, J. Christ, R. Tripuraneni, S. Nadimpalli, and A. Ameli, "Interlayer Adhesion and Fracture Resistance of Polymers Printed through Melt Extrusion Additive Manufacturing Process," *Mater. Des.*, vol. 156, pp. 351–361, 2018.

[68] U. Kalsoom, N. Nesterenko, and B. Paull, "RSC Advances Recent developments in 3D printable composite materials," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 65, pp. 60355–60371, 2016.

[69] Y. Yang *et al.*, "Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology : From Materials to Functional Structures," vol. 1706539, pp. 1–34, 2018.

[70] J. Gonzalez-Gutierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, and C. Holzer, "Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives," vol. 11, no. 5, 2018.

[71] D. Grewell and A. Benatar, "Welding of Plastics : Fundamentals and New Developments," vol. 22, no. 1, pp. 43–49, 2007.

[72] M. J. Oliveira, C. A. Bernardo, and D. A. Hemslev, “The Effect of Flame Retardants on the Hot-Plate Welding of Talc-Filled Polypropylene,” vol. 42, no. 1, 2002.

[73] M. J. Oliveira, C. A. Bernardo, and D. A. Hemslev, “Morphology and Mechanical Behavior of Polypropylene Hot Plate Welds,” vol. 41, no. 11, pp. 1913–1922, 2001.

[74] V. K. STOKES, “Joining Methods for Plastics and Plastic Composites: An Overview,” *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, vol. 29, no. 19, 1989.

[75] “A Complete Guide to Polycarbonate (PC).” [Online]. Available: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polycarbonate-pc-plastic. [Accessed: 28-Sep-2019].

[76] “Ensinger Plastics.” [Online]. Available: https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/engineering-plastics/pa-polyamide. [Accessed: 28-Sep-2019].

[77] “Black Magik3D.” [Online]. Available: http://www.blackmagic3d.com/G6-Impact-p/bm3d-g6imp-175.htm. [Accessed: 26-Sep-2018].

[78] “NinjaTek.” [Online]. Available: https://ninjatek.com/ninjaflex/. [Accessed: 26-Sep-2018].

[79] “Recreus.” [Online]. Available: https://recreus.com/es/diametro-175/34-26-filaflexnaranja175mm11lb-500gr-8435424800264.html#/3-diametro-175mm/4-peso_neto-500gr/11-color-naranja. [Accessed: 26-Sep-2018].

[80] “Mcpp-3dp.” [Online]. Available: https://www.mcpp-3dp.com/products/flex-45/#1509704059168-1102037e-c522. [Accessed: 26-Sep-2018].

[81] H. D. Espinosa, A. L. Juster, F. J. Latourte, O. Y. Loh, D. Gregoire, and P. D. Zavattieri, “Tablet-level origin of toughening in abalone shells and translation to synthetic composite materials,” *Nat. Commun.*, vol. 2, no. 2, pp. 173–179, 2011.