

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rafaela Marisa Fernandes Teixeira

Potencial da impressão 3D na produção de estruturas técnicas para compósitos

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 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Rafaela Marisa Fernandes Teixeira

Endereço eletrónico: a66689@alunos.uminho.pt

Telefone: 917068289

Cartão de Cidadão: 14392658

Título da dissertação: Potencial da impressão 3D na produção de estruturas técnicas para compósitos

Orientadores:

Professora Doutora Olga Machado de Sousa Carneiro

Professor Doutor Alexandre Manuel Teixeira de Barros Ferreira da Silva

Ano de conclusão: 2017

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE
DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura:

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às várias pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste projeto.

Aos meus orientadores, os professores Olga Carneiro e Alexandre Silva, pelo excelente apoio prestado, disponibilidade, interesse e incentivo ao longo de todo o projeto e pela orientação durante os vários problemas que foram surgindo ao longo das várias etapas do trabalho realizado.

Aos técnicos do Departamento de Polímeros pelo auxílio prestado no uso dos vários equipamentos utilizados.

À Andreia Vilela do PIEP, pelo auxílio dado durando os ensaios de impacto.

Ao Nuno, da xpim 3D printing, pela enorme ajuda que deu ao longo de todo o processo de impressão.

Um enorme agradecimento aos meus pais pelo esforço que fizeram para me proporcionarem todo o meu percurso acadêmico, por estarem sempre presentes em todos os momentos, pela força, incentivo e carinho que me deram. Sem eles, nada disto seria possível!

À minha irmã, pela amizade, carinho, companheirismo, ajuda, paciência e acima de tudo por estar sempre a meu lado nos bons e maus momentos e nunca me deixar desistir. Muito obrigada por tudo!

Um agradecimento muito especial, ao meu namorado João, por me acompanhar e estar sempre a meu lado ao longo deste percurso, pela paciência enorme que teve em me aturar, por todo o amor, carinho, bons momentos, incentivo e dedicação.

Por último, agradeço aos meus grandes amigos Rui, Elisa, Marta e Ana, pela vossa amizade, companheirismo, ajuda, alegrias, coragem e persistência.

A todos, um obrigado do coração!

Resumo

Os compósitos desempenham um papel importante como materiais estruturais numa variedade de áreas de engenharia, devido ao seu potencial para combinar as melhores propriedades mecânicas dos seus constituintes. Na natureza, estes existem e exibem estruturas fascinantes, sendo que para além das pesquisas que têm vindo a ser realizadas para uma melhor compreensão destes materiais, tem também havido um interesse crescente por forma a encontrar maneiras de sintetizar compósitos com características mecânicas igualmente fascinantes. O nacre, a camada interna de material iridescente de alguns moluscos, é um dos materiais naturais que impregnam estruturas hierárquicas para alcançar uma elevada resistência com base em constituintes relativamente fracos. Na microescala, a estrutura do nacre assemelha-se a uma parede de estrutura tijolo-argamassa tridimensional.

Contudo, não é fácil replicar certas estruturas, sendo que a impressão 3D oferece um caminho atrativo para o fabrico de materiais com arquiteturas complexas. Das várias tecnologias aditivas, a de fabrico por filamento fundido (FFF) é seguramente aquela que tem hoje maior potencial. Neste contexto, a presente dissertação teve como objetivo avaliar o potencial do processo de impressão FFF multi-material para a produção de estruturas técnicas a incorporar em compósitos laminados, onde inicialmente se realizou de uma pesquisa bibliográfica sobre compósitos inspirados na natureza, tendo-se focado a pesquisa essencialmente na estrutura hierárquica do nacre.

Depois de desenhados os provetes com a geometria selecionada para os respetivos ensaios mecânicos através de um programa de desenho 3D, o *SolidWorks*, realizou-se a impressão dos mesmos. Visto a estrutura a desenvolver ser rígida com inclusão de uma interface flexível, utilizaram-se dois tipos de materiais, o G6-Impact um material rígido composto por HIPS reforçado com fibras de carbono e grafeno, e o Flex 45 um material flexível composto por TPC, formando as seguintes combinações de materiais: G6-Impact / Flex 45, G6-Impact / G6-Impact e apenas G6-Impact, permitindo assim obter um termo de comparação e obtenção de melhores conclusões acerca do desempenho mecânico destas estruturas.

Posteriormente procedeu-se à caracterização dos provetes em ensaios de tração, flexão e impacto, onde se verificou que os resultados obtidos não vão de encontro ao esperado, uma vez que os provetes impressos com as estruturas técnicas fraturavam na zona das interfaces, apresentando um fraco desempenho mecânico quando comparados com os provetes impressos sem essas estruturas. Analisando os provetes microscopicamente, conclui-se que a qualidade de impressão era relativamente fraca afetando visivelmente o desempenho mecânico destas estruturas.

Apesar dos resultados obtidos, a tecnologia FFF poderá ter potencial para a produção destas estruturas, contudo, para atingir um nível de desempenho suficiente é necessário garantir condições de produção adequadas (resolução, etc.).

Palavras-chave: FFF, Compósitos, Estruturas hierárquicas, Nacre.

Abstract

Composites play an important role as structural materials in a variety of engineering areas, due to their potential to combine the best mechanical properties of their constituents. In nature, these exist and exhibit fascinating structures, and in addition to the researches that have been carried out for a better understanding of these materials, there is also a vividly increasing way to find methods to synthesize composites with equally fascinating mechanical characteristics. Nacre, an inner layer of iridescent materials from some mollusks, is one of the natural materials that impregnate hierarchical structures to achieve high strength based on relatively weak constituents. At the microscale, a nacre structure resembles a three-dimensional brick-mortar structure wall.

However, it is not easy to replicate certain structures, and 3D printing offers an attractive way to manufacture materials with complex architectures. Of the various additive technologies, FFF is surely the one with the greatest potential. In this context, the present dissertation aims to evaluate the potential of the multi-material FFF printing process for the production of technical structures to be incorporated in laminated composites, where a bibliographic research was first carried out on nature-inspired composites and essentially in the hierarchical structure of the nacre.

After the specimens were drawn with the geometry selected for the respective mechanical tests through a 3D CAD Software, SolidWorks, they were printed. Since the structure was to be development being rigid with the inclusion of a flexible interface, two types of materials were used, the G6-Impact a rigid material composed of HIPS reinforced with carbon fibers and graphene, and Flex 45 a flexible material composed of TPC, forming the following combinations of materials: G6-Impact / Flex 45, G6-Impact / G6-Impact and G6-Impact, being possible to obtaining a comparator and better conclusions about the mechanical performance of these structures.

Subsequently, the specimens were characterized by the mean of tensile, flexural and impact tests, where it was verified that the obtained results do not go as expected, since the test pieces printed with the technical structures fractured in the interface zone, presenting a weak mechanical performance when compared to test pieces printed without these structures. By analyzing the specimens microscopically, it was concluded that the print quality was relatively poor, visibly affecting the mechanical performance of these structures.

Despite the results, the FFF technology may have potential for the production of these structures, however, to achieve a sufficient level of performance is necessary to ensure adequate production conditions (resolution, etc.).

Keywords: FFF, Composites, Hierarchical structures, Nacre.

Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Metodologia.....	9
1.4. Organização da dissertação.....	10
2. Compósitos técnicos inspirados na natureza.....	12
3. Desenvolvimento.....	20
3.1. Geometria base/ Definição das dimensões.....	20
3.2. Materiais e Condições de impressão.....	22
3.3. Provetes.....	25
4. Ensaio Mecânicos.....	28
4.1. Condições de Ensaio.....	28
4.2. Resultados do Ensaio de Tração.....	32
4.3. Resultados do Ensaio de Flexão.....	36
4.4. Resultados do Ensaio de Impacto.....	38
4.5. Análise Global.....	40
5. Conclusão.....	43
5.1. Sugestão para trabalhos futuros.....	44
Referências.....	46
ANEXOS.....	49

Índice de Figuras

Figura 1. Exemplos de uma ampla gama de estruturas hierárquicas na natureza [8].	3
Figura 2. Rebarba de uma semente semelhante à semente que deu origem ao velcro [3].	3
Figura 3. Osga e representação da estrutura de fixação em diferentes escalas [10].	4
Figura 4. (a) Imagem da asa dianteira; (b) Imagem da asa traseira; (c) Imagem microscópica da borboleta; (d) Espectros de refletância das escamas [14].	5
Figura 5. O efeito da folha de lótus [14]: (a) Folha de lótus em que a água não molha; (b) Esquema da superfície.	6
Figura 6. Quatro tipos de propriedades biológicas encontradas na natureza [16]: a) propriedades de auto-limpeza; b) propriedades mecânicas, c) cor através da estrutura, e d) propriedades óticas: asas de cigarra, olhos traça e espora esponjosa.	7
Figura 7. Garrafa Vitalis com inspiração biomimética [18].	8
Figura 8. Impressora 3D utilizada	9
Figura 9. Exemplos de motivos estruturais universais encontrados em materiais biológicos [19].	13
Figura 10. a) Vista interna da concha de abalone vermelho; b) Secção transversal da mostrando a camada de nacre [25].	14
Figura 11. Estrutura do nacre na mesoescala [27]: a) Representação esquemática das placas de nacre; b) Vista superior das placas de nacre; c) Imagem de microscópica de uma superfície de fratura do nacre.	15
Figura 12. Morfologia de uma placa plana vista em perspectiva e vista em corte transversal [28].	15
Figura 13. Mecanismos entre interfaces, que geram resistência ao cisalhamento e ao endurecimento [27]: a) Alongamento do biopolímero; b) Contato entre as asperidades na superfície das placas; c) Pontes minerais inicialmente intactas (à esquerda) e, potencial de rebolqueio após a quebra (direita).	16
Figura 14. a) Exemplos de pontes minerais (indicadas pelas setas) e (b) nanoasperidades na superfície de uma placa [15].	17
Figura 15. Estrutura hierárquica do nacre natural e composto bioinspirado [24]: a) Concha de abalone vermelha b) Microscopia eletrônica de varredura mostrando a micro / nanoestrutura do nacre natural. A inserção mostra uma imagem das pontes entre as placas. c) Composto artificial inspirado no nacre. A inserção mostra um detalhe das pontes entre placas.	17
Figura 16. Resistência à tração e compressão do nacre sob diferentes direções de aplicação de carga [29].	18

Figura 17. Representação da geometria selecionada. a) Estrutura tijolo-argamassa; b) Interface entre as placas.	20
Figura 18. Dados relativos à avaliação do desempenho do composto de ABS- epóxi baseado na estrutura do nacre a) Tabela que mostra as energias armazenadas e dissipadas normalizadas para amostras de geometria variável; b) Mapa dos modos de falha, relacionando o ângulo de cauda de andorinha com o comprimento L) [24].	21
Figura 19. Representação das dimensões da estrutura base (mm)	22
Figura 20. Estruturas usadas na determinação da temperatura de impressão: (a) 1ª estrutura; (b) 2ª estrutura.	23
Figura 21. Estrutura usada para determinar a compatibilidade dos pares de materiais.	24
Figura 22. Dimensões do provete de tração a) Provete de referência b) Provete híbrido (escala em mm).	26
Figura 23. Representação esquemática do ensaio de flexão.	26
Figura 24. Dimensões dos provetes de flexão. a) Provete de referência; b) Provete híbrido (escala em mm).	27
Figura 25. Dimensões dos provetes de impacto. a) Provete de referência; b) Provete híbrido (escala em mm).	28
Figura 26. Equipamento utilizado no ensaio de tração	29
Figura 27. Equipamento utilizado no ensaio de flexão	31
Figura 28. Equipamento utilizado no ensaio de impacto	32
Figura 29. Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração para um provete de cada combinação de materiais.	33
Figura 30. Resultados obtidos no ensaio de tração: a) Tensão de cedência / Tensão de rotura; b) Deformação de rotura; c) Módulo de Young.	34
Figura 31. Provetes após o ensaio de tração; a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/G6-Impact	35
Figura 32. Curva Tensão x Deformação do ensaio de flexão para um provete de cada combinação de materiais	36
Figura 33. Provetes após o ensaio de flexão; a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/G6-Impact	37
Figura 34. Curva Força x Deslocamento do ensaio de impacto para um provete de cada combinação de materiais.	38

Figura 35. Exemplo de um gráfico Força x Deflexão [36]	39
Figura 36. Provetes após o ensaio de impacto: a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45.	40
Figura 37. Imagem microscópica dos provetes; a) e b) G6-Impact/Flex 45; c) e d) G6-Impact/G6-Impact;	41
Figura 38. Imagem microscópica do provete impresso	42
Figura 39. Imagem microscópica do provete impresso com dimensões ampliadas	42
Figura 40. Provetes de tração impressos. a) G6-Impact/Flex 45; b) G6-Impact/G6-Impact/; c) G6-Impact	49
Figura 41. Provetes de flexão impressos. a) G6-Impact/Flex 45; b) G6-Impact/G6-Impact/; c) G6-Impact	50
Figura 42. Provede de Impacto impresso. a) G6-Impact/ Flex 45	50
Figura 43. Provetes de tração aquando o ensaio mecânico	50
Figura 44. Provetes de flexão aquando o ensaio mecânico	50
Figura 45. Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/ G6-Impact	50
Figura 46. Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/ G6-Impact	50
Figura 47. Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45;	50

Índice de Tabelas

Tabela 1. Temperatura de impressão usada nos pares de materiais	24
Tabela 2. Parâmetros de impressão fixos	25
Tabela 3. Parâmetros usados no ensaio de tração.	29
Tabela 4. Parâmetros usados no ensaio de flexão.	30
Tabela 5. Parâmetros usados no ensaio de impacto.	31
Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de tração	33
Tabela 7. Resultados obtidos no ensaio de flexão	36
Tabela 8. Resultados obtidos no ensaio de Impacto	38

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
E_m	Energia na Força Máxima
E_p	Energia no punção
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
F_m	Força Máxima
HIPS	<i>High Impact Polystyrene</i>
L	Largura
I_m	Deflexão na força máxima
I_p	Deflexão no punção
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i>
PLA	Poli (ácido láctico)
PC	Policarbonato
TPC	Elastómero Termoplástico de Co-poliéster
TPU	Elastómero termoplástico de poliuretano
UV	Ultravioleta
t	Espessura
θ	Ângulo
σ	Tensão
ε	Deformação

1. INTRODUÇÃO

Ao longo de cerca de 3,8 mil milhões de anos, a natureza aperfeiçoou materiais e “tecnologias”, com um desempenho excepcional e inteiramente bio-degradáveis [1]. Tendo em conta que os materiais biológicos foram expostos à seleção natural ao longo de milhões de anos, surge então uma questão interessante sobre como esses materiais têm vindo a evoluir as suas estruturas e composições de forma a cumprir requisitos mecânicos específicos do seu meio ambiente, e como essas soluções podem ser comparadas com as fornecidas pelos compósitos artificiais [2].

O estudo dos sistemas biológicos como estruturas remonta o início do século XX. A obra clássica de D'Arcy W. Thompson, publicada pela primeira vez em 1917, pode ser considerada o primeiro trabalho importante nesta área, onde este realizou uma análise de sistemas biológicos como estruturas de engenharia biológicas, obtendo relações que descreviam a sua forma [3].

A observação da natureza pode ser a solução para diversos problemas do mundo atual [4]. As estruturas hierárquicas encontradas na natureza, altamente organizadas da escala nano- à micro-, possuem várias propriedades intrigantes, que proporcionam novas ideias e regras de design para estruturas artificiais com múltiplas funções [5]. Por isso, não admira que nos últimos anos a comunidade científica tenha vindo a debruçar-se sobre este assunto [1].

Curiosamente, as nano- e as microestruturas têm diferentes funções. As microestruturas geralmente têm uma influência significativa nas propriedades mecânicas como por exemplo, estabilidade, força e flexibilidade, enquanto que as nanoestruturas são responsáveis pelas funcionalidades principais, como molhabilidade, cor ou adesão [5].

Para criar novos materiais inspirados em materiais biológicos naturais, não é possível fazer apenas uma “cópia”, mas é sim necessária uma compreensão das suas características estruturais e do seu processo de formação para encontrar soluções técnicas especificamente adaptadas a uma determinada aplicação [6].

Há uma série de características inter-relacionadas que definem os materiais biológicos e os distinguem das suas contrapartes sintéticas:

- i. Automontagem: os sistemas biológicos são formados devido à sua auto-organização. Assim, para se poder compreender os sistemas biológicos é necessário, entre outras coisas, a compreensão da automontagem.

- ii. Multifuncionalidade: existem determinados componentes que têm mais que uma finalidade. Por exemplo, as penas de uma ave oferecem capacidade de voo, camuflagem e isolamento.
- iii. Hierarquia: A composição e a estrutura dos componentes orgânicos e inorgânicos dentro dos compósitos biológicos da natureza são muitas vezes intimamente conectadas aos diferentes níveis de escala estrutural, criando uma hierarquia que otimiza força e dureza, minimizando o peso para aplicações específicas.
- iv. Hidratação: as propriedades são altamente dependentes do nível de água na estrutura.
- v. Condições de síntese moderadas: a maioria dos materiais biológicos são fabricados à temperatura e pressão ambiente, bem como num meio aquoso, uma diferença notável relativamente aos materiais sintéticos.
- vi. Evolução e restrições ambientais: a disponibilidade dos recursos na natureza é reduzida, o que limita a morfologia e as propriedades resultantes. As estruturas não são necessariamente otimizadas para todas as propriedades, contudo são o resultado de um processo evolutivo que leva a soluções satisfatórias.
- vii. Capacidade de auto-reparação: tendo em conta que os materiais sintéticos sofrem danos e falhas irreversíveis, os materiais biológicos têm a capacidade de auto-reparação, devido à vascularização e células incorporadas na estrutura [7].

Na Figura 1 encontram-se alguns exemplos de uma ampla gama de estruturas hierárquicas na natureza, sendo estas classificadas em duas categorias dependendo da sua função: i) propriedades de superfície (molhabilidade/adesão) e em ii) outras propriedades (ópticas/ filtração/ fricção).

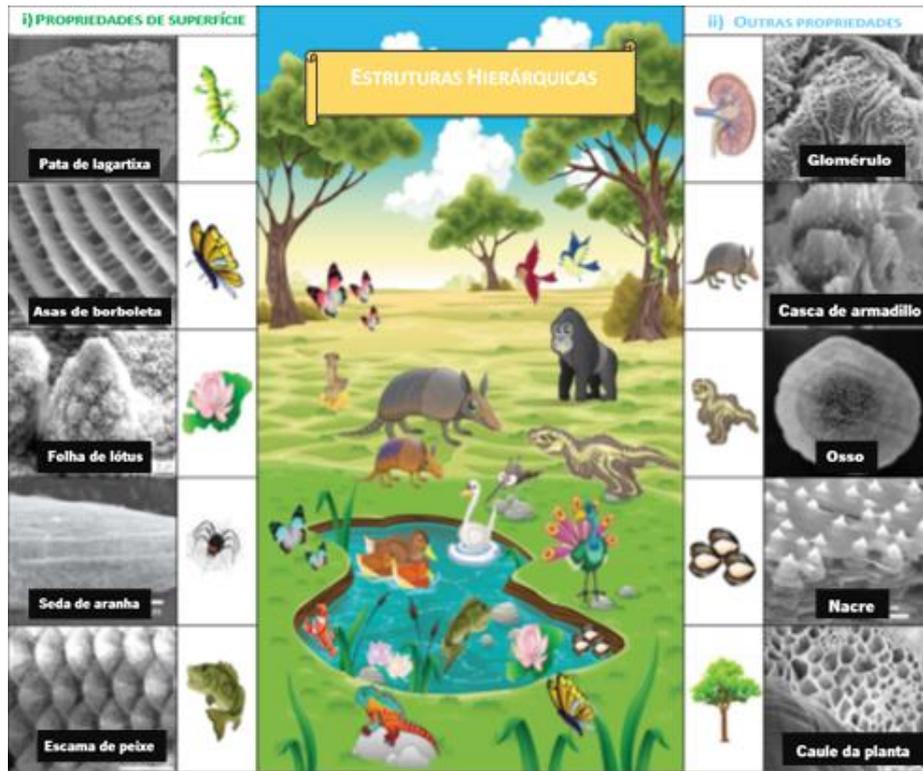


Figura 1. Exemplos de uma ampla gama de estruturas hierárquicas na natureza [8].

Um dos materiais inspirados na natureza comercializados mais bem-sucedidos ficou literalmente preso às calças do seu inventor. No verão de 1948, o engenheiro elétrico George de Mestral estava a caminhar quando se apercebeu que as suas calças estavam cobertas por uma infinidade de rebarbas de semente. Enquanto retirava rebarba após a rebarba do tecido das suas roupas, a curiosidade cresceu na sua mente. Quando investigou a estrutura da rebarba através do microscópio, percebeu o segredo para a capacidade das sementes se prenderem a muitas superfícies. Pequenos ganchos cobriam a semente. Foi aí que nasceu o veludo e o velcro, dando origem a uma indústria bastante rentável [3]. Na Figura 2 encontra-se a rebarba de uma semente idêntica à semente que deu origem ao velcro.

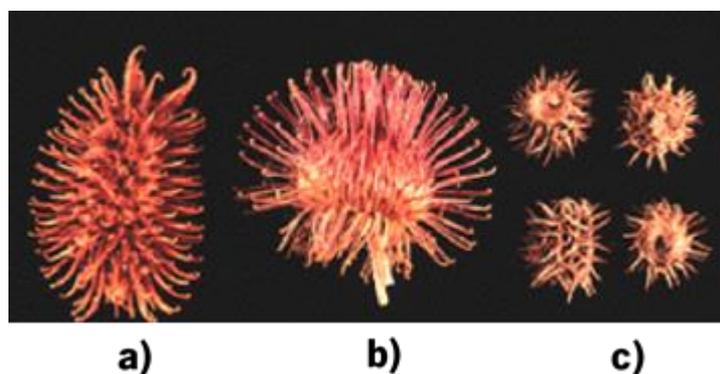


Figura 2. Rebarba de uma semente semelhante à semente que deu origem ao velcro [3].

Um outro exemplo de uma solução de design natural que os seres humanos estão dispostos a imitar é a habilidade que as osgas têm de escalar paredes e tetos, inspirando estudos para a criação de adesivos sintéticos com as mesmas capacidades de desempenho: adesivos que não usam cola, autolimpeza, reutilização e funcionalidade em superfícies húmidas e rugosas. A osga é o exemplo de um animal que aparentemente pode desafiar a gravidade. Como podemos ver na Figura 3, o segredo está na estrutura compósita das suas patas, onde cada almofada do dedo é coberta por milhões de cerdas queratinosas parecidas com cabelo. Cada uma delas, por sua vez, se ramifica em centenas de pontas planas chamadas espátulas, que contactam intimamente com as superfícies [9] [10] [11]. No entanto, o mecanismo pelo qual ele se anexa não é exclusivo. Moscas, insetos e outros desenvolveram dispositivos similares [10].

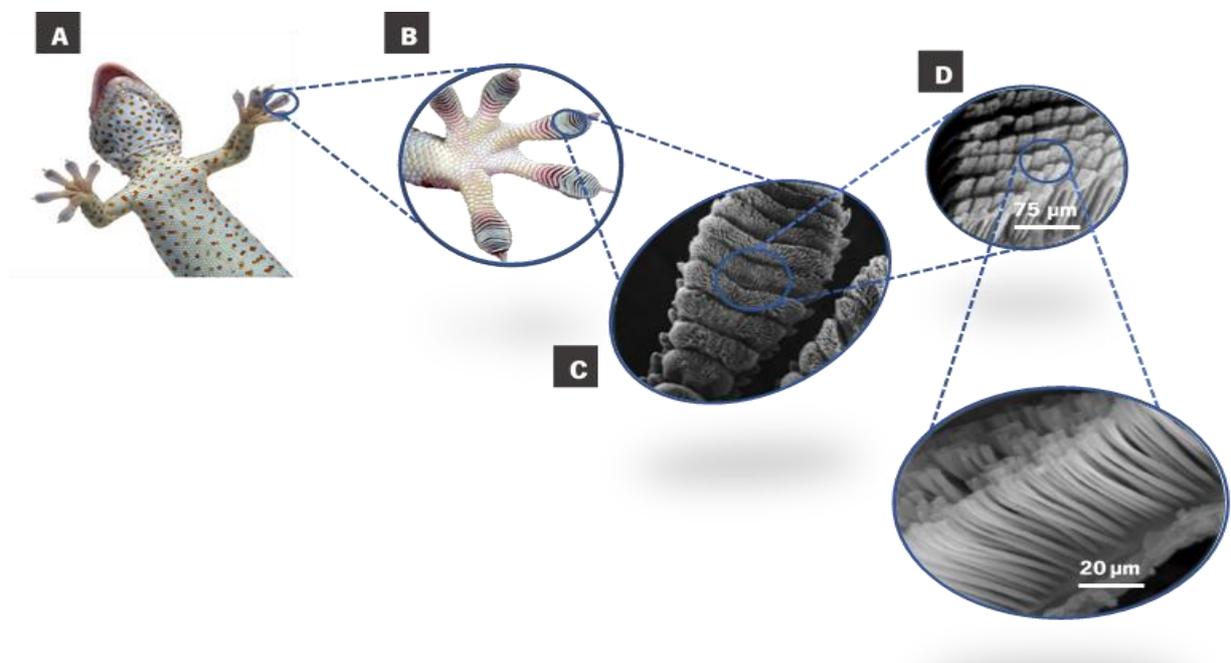


Figura 3. Osga e representação da estrutura de fixação em diferentes escalas [10].

Recentemente, cada vez mais investigadores estão a analisar as asas das borboletas [12]. Como é possível observar na Figura 4, a arquitetura na sua superfície não só lhe fornece uma aparência vistosa por causa das suas cores deslumbrantes, mas também fazem com que estas tenham propriedades atraentes como superfícies não refletoras, superfícies altamente refletoras, superfícies coloridas (em alguns casos, inclui a capacidade de controlar dinamicamente a coloração) e superfícies transparentes [13].

Verificou-se que a maioria dessas cores iridescentes são causadas por estruturas fotônicas periódicas nas escamas que compõem as superfícies dessas asas [12].

As borboletas aproveitam os efeitos óticos da singularidade das asas para alcançar diferentes estratégias, como camuflagem, comunicação e envio de advertências aos predadores. Além disso, vários estudos avaliaram os efeitos de aperfeiçoamento dessas microestruturas na hidrofobicidade e propriedades aerodinâmicas [12].

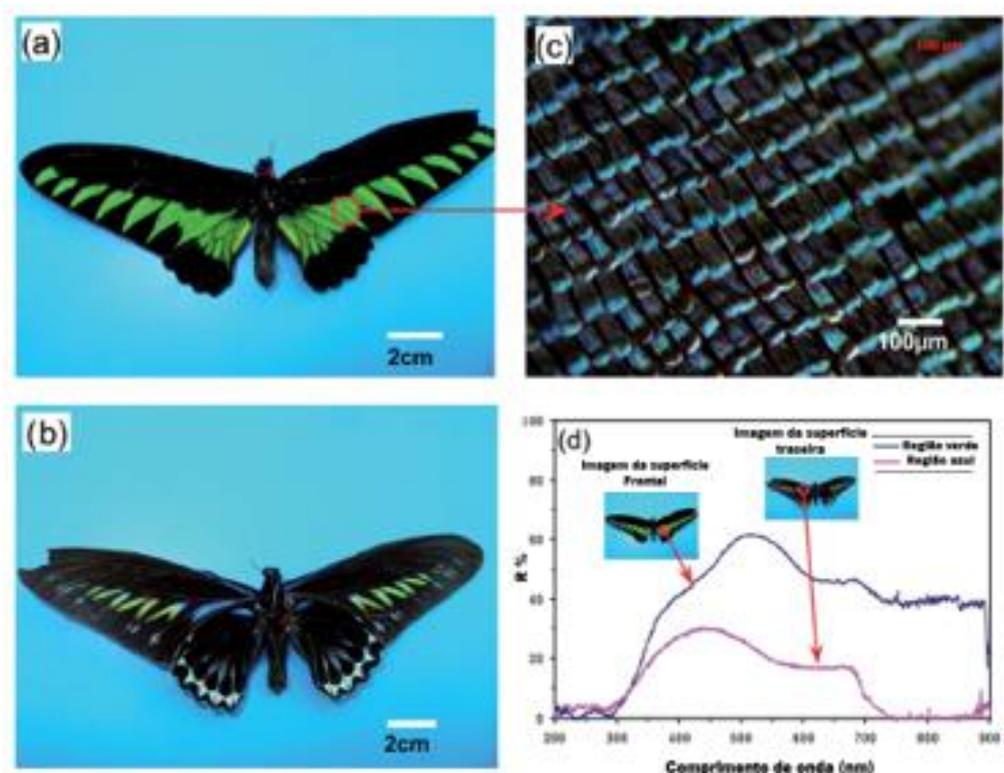


Figura 4. (a) Imagem da asa dianteira; (b) Imagem da asa traseira; (c) Imagem microscópica da borboleta; (d) Espectros de refletância das escamas [14].

A capacidade de autolimpeza é outra das características dos sistemas naturais, como acontece por exemplo com as folhas da flor de lótus, cuja microestrutura se desenvolveu para providenciar esse efeito [5]. Possivelmente foi inspirado no exemplo da flor de lótus, que na década de 60 foram desenvolvidos os primeiros materiais com a capacidade de autolimpeza [5].

A água no topo da flor de lótus não molha, contudo concentra-se em pequenas áreas devido à hidrofobia da superfície, resultante do ângulo de contato existente, como se pode visualizar na Figura 5. Esta hidrofobia tem um efeito importante, fazendo com que as gotas de água deslizem sobre a superfície. Neste percurso, as gotas agarram as partículas de pó diminuindo a sua energia superficial, sendo absorvidas nas gotas de água. Desta forma, a superfície fica limpa [15].

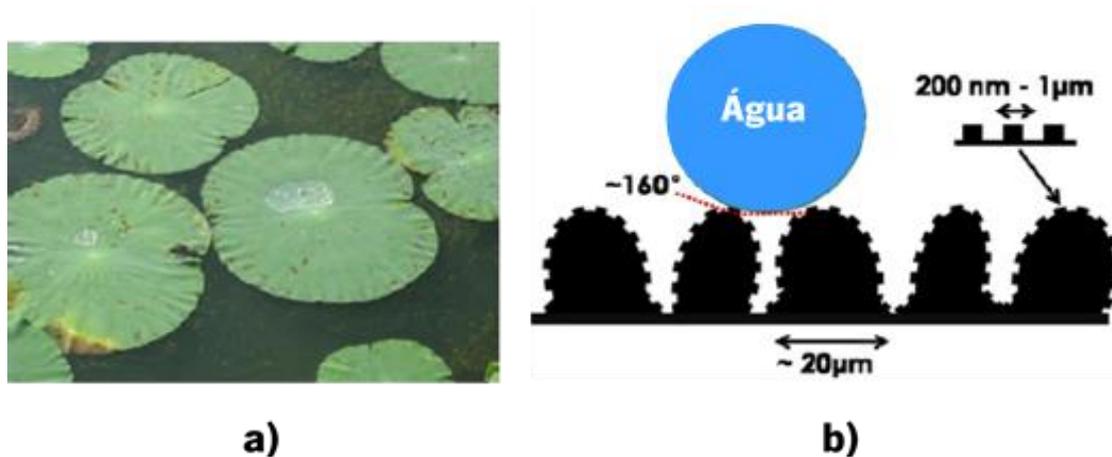


Figura 5. O efeito da folha de lótus [14]: (a) Folha de lótus em que a água não molha; (b) Esquema da superfície.

Outro aspecto interessante é a forma como os sistemas biológicos sobrevivem em locais com condições adversas, como o deserto. O primeiro grande desafio é o desgaste resultante do vento e da areia na superfície do corpo. Na maioria das aplicações industriais o desgaste é indesejável e pode levar a falhas catastróficas, limitando a vida útil dos componentes.

Felizmente, existem vários casos de animais que possuem geometrias de superfície peculiares desenvolvidas especificamente para resistir ao desgaste do solo e evitar que este adira aos corpos dos animais [14].

Na Figura 6, encontram-se 4 tipos de propriedades biológicas que podem ser encontradas na natureza, sendo que em cada caso estão representados alguns exemplos de sistemas biológicos e a correspondente imagem microscópica na escala micro e nano.

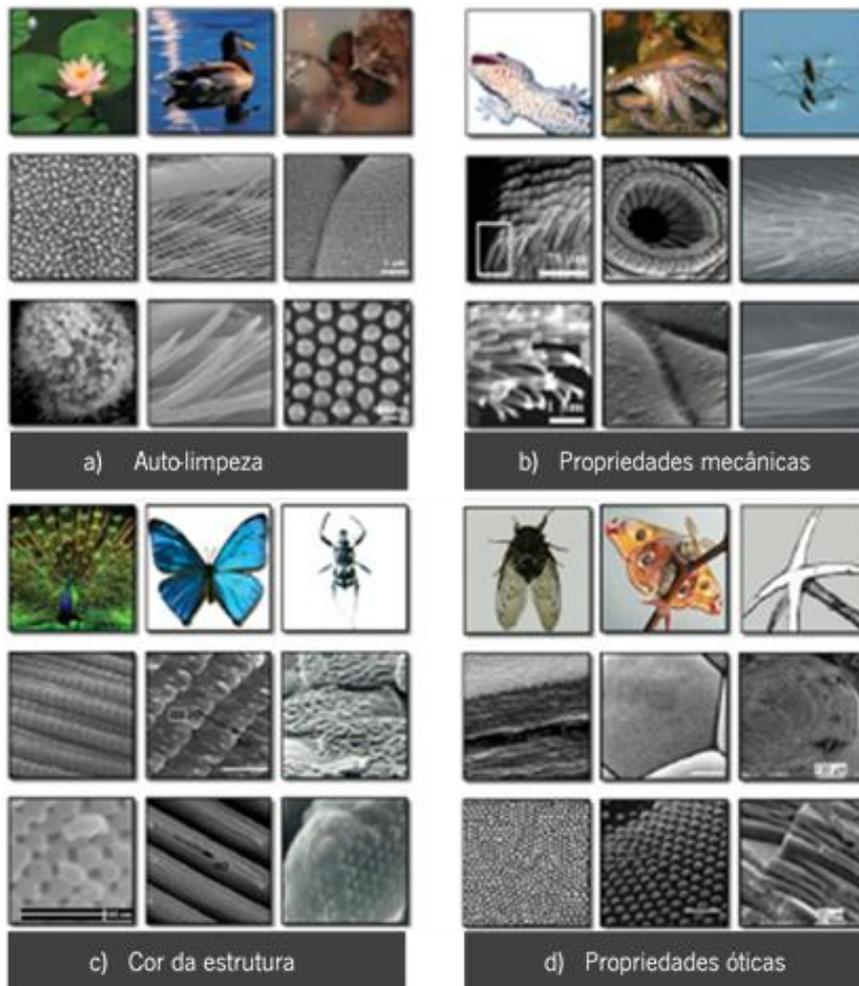


Figura 6. Quatro tipos de propriedades biológicas encontradas na natureza [16]: a) propriedades de auto-limpeza: b) propriedades mecânicas, c) cor através da estrutura, e d) propriedades óticas: asas de cigarra, olhos traça e espóra esponjosa.

Contudo, embora tenham surgido exemplos notáveis realizados em laboratório, permanece incerto se eles podem ser transferidos para uso em aplicações práticas [17].

Um exemplo concreto do uso da metodologia de biomimética é a nova garrafa Vitalis. A *Unicer* queria uma garrafa de PET com uma forte identidade de marca e onde fosse incorporada menor quantidade de material. Para tal a *Logoplaste Innovation Lab* usou como inspiração o pinheiro de casca branca. Este pinheiro encontra-se em locais de elevada altitude, fustigado pelos ventos fortes e curvado pela neve pesada, sendo que uma estratégia que permite sobreviver a condições tão adversas são as fibras em espiral, existentes no tronco da árvore, que proporcionam resistência mecânica, entre outras funções. Desta forma, a *Logoplaste*, testou o uso de padrões espirais como os do pinheiro na nova garrafa Vitalis, observada na Figura 7, onde as espirais fornecem resistência mecânica e beleza, tornando a garrafa mais leve, economizando 250 toneladas de matéria-prima por ano [18].



Figura 7. Garrafa Vitalis com inspiração biomimética [18].

1.1. Motivação

Na natureza, e particularmente entre a classe de materiais mineralizados, é comum encontrar compósitos que combinem constituintes simples com características mecânicas primitivas em arquiteturas complexas para formar estruturas compostas com propriedades mecânicas de fratura bastante superiores às dos seus constituintes. Para além das pesquisas que têm sido realizadas para uma maior compreensão desses materiais, existe um crescente interesse em encontrar métodos com o potencial de sintetizar compósitos com características mecânicas igualmente surpreendentes [19]. Contudo, é complexo replicar determinadas estruturas através de métodos tradicionais de fabrico [20].

A impressão 3D oferece um caminho atrativo para o fabrico de materiais funcionais com arquiteturas complexas inspiradas em sistemas biológicos. A sua utilização para imitar algumas dessas características estruturais pode abrir um caminho para o fabrico de estruturas que superam as suas atuais contrapartes sintéticas ou que enderecem uma função desejada [19].

Das várias tecnologias de impressão, a de fabrico com filamento fundido (FFF) é certamente aquela que tem hoje maior expressão. Com a possibilidade de imprimir a partir de filamentos compósitos, e usando equipamentos multimaterial (com múltiplos extrusores), há um enorme potencial de fabrico de estruturas técnicas de elevada complexidade.

Na Figura 8 encontra-se a impressora utilizada, composta por múltiplos extrusores utilizando a tecnologia FFF, permitindo a impressão multimaterial.

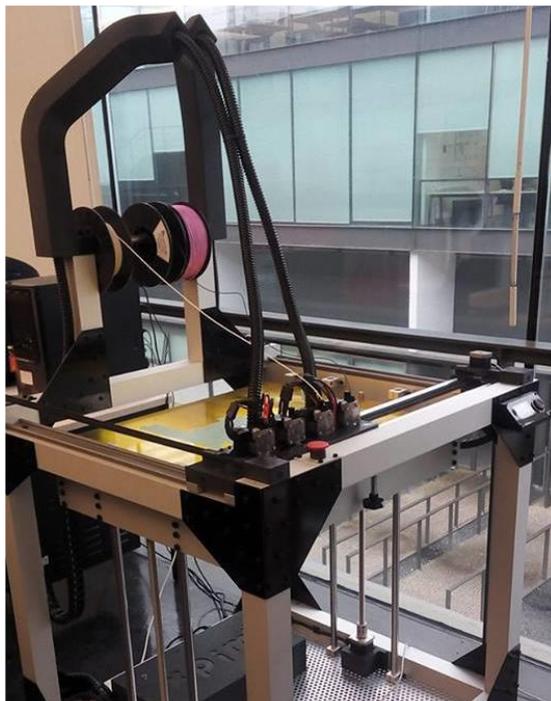


Figura 8. Impressora 3D utilizada

1.2. Objetivos

O principal objetivo da dissertação foi avaliar o potencial do processo de impressão FFF multimaterial, com equipamento adquirido no âmbito de um projeto enquadrador, para a produção de estruturas técnicas a incorporar em compósitos laminados.

Com a concretização do objetivo anteriormente descrito, procurou-se:

- i. Definir os requisitos/especificações das estruturas técnicas a desenvolver e a produzir no âmbito do trabalho;
- ii. Avaliar quais as condições de impressão adequadas à utilização em equipamentos FFF;
- iii. Selecionar os possíveis materiais que se adequam à concretização do trabalho;
- iv. Avaliar o desempenho das estruturas técnicas em diferentes solicitações mecânicas.

1.3. Metodologia

Para o desenvolvimento das estruturas técnicas para a área de aplicação pretendida na presente dissertação, inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre compósitos inspirados na natureza, focada essencialmente na estrutura hierárquica do nacre.

Visto que a técnica FFF oferece um caminho atrativo para o fabrico de materiais funcionais com uma maior liberdade de geometria e de conjugação de materiais, recorreu-se a esta para o desenvolvimento de um compósito sintético inspirado no nacre natural.

Através de um programa de desenho 3D, o *Solidworks*, foi desenhada a geometria selecionada para a estrutura, bem como os provetes para os respetivos ensaios mecânicos, nomeadamente, tração, flexão e impacto. Estes foram desenhados segundo as normas ASTM D 638 – 02a, ASTM D790 e EN ISO 6603-2:2000 para os provetes de tração, flexão e impacto, respetivamente.

Seguidamente, realizou-se a impressão dos provetes utilizando dois tipos de materiais diferentes, o G6-Impact (filamento rígido) e o Flex 45 (filamento flexível), visto a estrutura a desenvolver ser rígida com a inclusão de uma interface flexível. Para cada ensaio mecânico foram impressos três tipos de provetes: G6-Impact / Flex 45, G6-Impact / G6-Impact e apenas G6-Impact, permitindo assim obter um termo de comparação e possibilitar uma maior compreensão e obtenção de melhores conclusões acerca do desempenho mecânico destas estruturas.

Por último foram realizados os respetivos ensaios mecânicos que permitiram avaliar o potencial destas estruturas técnicas para satisfação dos objetivos.

1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. No primeiro capítulo é realizada uma introdução à dissertação, onde é apresentada a motivação, objetivos, metodologia e organização da dissertação.

No segundo capítulo, intitulado *Compósitos técnicos inspirados na natureza*, é feita uma breve apresentação de alguns dos compósitos que desempenham um papel fundamental como materiais estruturais, sendo aprofundada e descrita em maior detalhe a estrutura do nacre, mostrando também o potencial da impressão 3D na produção destas estruturas.

O terceiro capítulo — *Desenvolvimento* — é dedicado à definição da geometria base a ser estudada, bem como a determinação das suas dimensões. Neste capítulo são também referidos os materiais utilizados e as condições de impressão, bem como as dimensões dos provetes (híbridos e de referência) para os ensaios mecânicos a realizar.

No quarto capítulo — *Ensaio mecânicos* — são apresentadas as condições dos ensaios realizados, nomeadamente tração, flexão e impacto e os respetivos resultados obtidos, fazendo-se por último uma análise global dos mesmos.

Para terminar são apresentadas conclusões gerais do trabalho, bem como as perspectivas de trabalho futuro.

2. COMPÓSITOS TÉCNICOS INSPIRADOS NA NATUREZA

Os compósitos desempenham um papel fundamental como materiais estruturais numa diversidade de áreas da engenharia devido ao seu potencial para combinar as melhores propriedades dos seus constituintes.

Na natureza, e em particular entre a classe de materiais mineralizados, é comum encontrar compósitos que apesar de combinarem componentes simples, apresentam características mecânicas excepcionais formando estruturas hierárquicas com propriedades mecânicas de fratura muito superiores às dos seus constituintes [21]. Estudos realizados salientaram que o elevado desempenho dos biomateriais depende fortemente dessas estruturas hierárquicas [20].

Materiais biológicos rígidos, como conchas, ossos, entre outros, têm vindo a tornar-se modelos inspiradores para compósitos estruturais sintéticos por causa das combinações incomuns das suas propriedades como resistência, rigidez, dureza e leveza [22].

Na figura 9, podem ver-se alguns desses materiais e as respetivas estruturas.

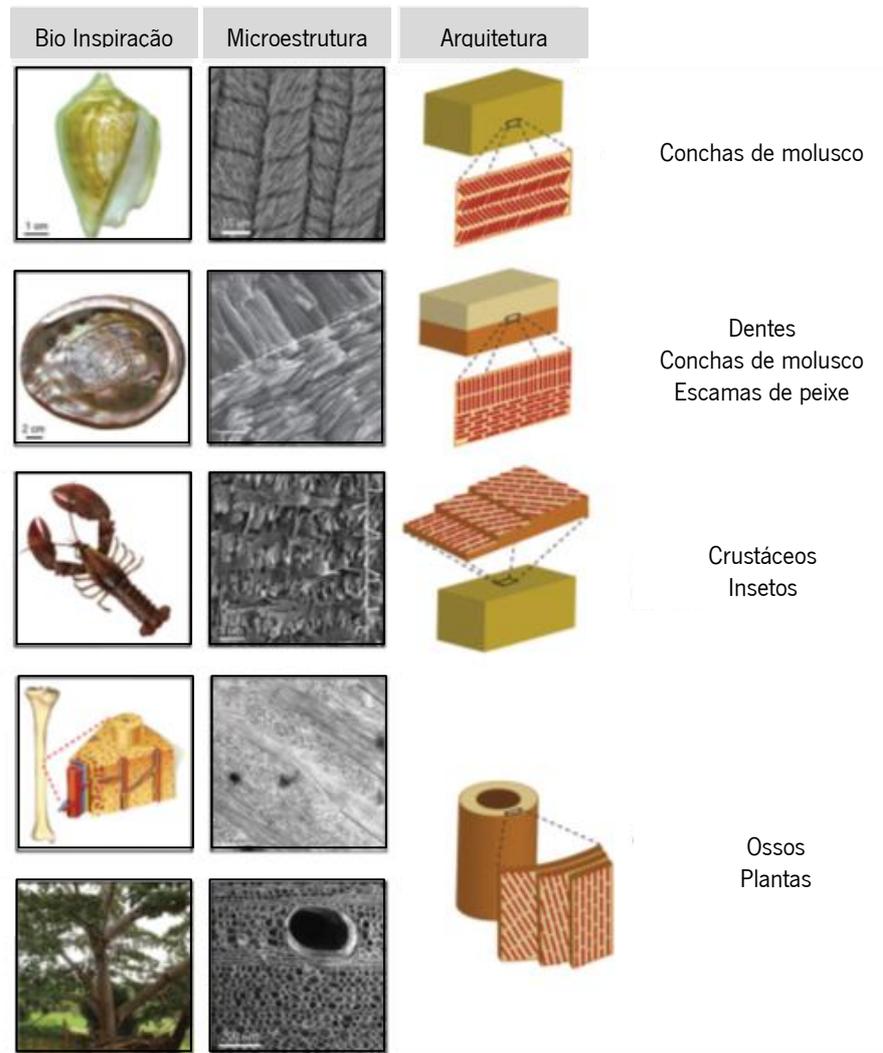


Figura 9. Exemplos de motivos estruturais universais encontrados em materiais biológicos [19].

A principal característica mecânica dos tecidos biológicos duros é, claramente, a sua "dureza", embora a "rigidez" (resistência à deformação) possa ser normalmente um termo mais concreto. A resistência à propagação de fissuras é outra propriedade importante que controla a resistência à tração de materiais duros [23].

O nacre, 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 [24].

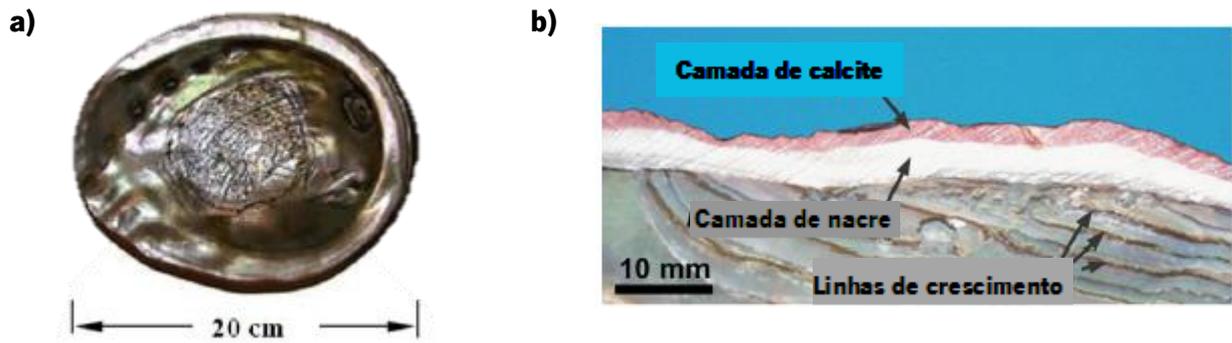


Figura 10. a) Vista interna da concha de abalone vermelho; b) Secção transversal da mostrando a camada de nacre [25].

- **Estrutura hierárquica do nacre**

O nacre é um material composto por 95 % de carbonato de cálcio, na forma de aragonite, em camadas com 5 % de matéria orgânica polimérica. Embora a aragonite seja o constituinte maioritário, o nacre é 3.000 vezes mais resistente que este componente [26].

Este, é parte de um sistema de armadura de duas camadas (Figura 10 b) usado por conchas marinhas para se protegerem dos predadores e de outras agressões mecânicas. A camada externa de calcite dura impede a penetração da fissura na concha, contudo é propensa a uma fratura frágil. A camada interna de nacre pode suportar deformações inelásticas maiores e dissipar uma quantidade de energia mecânica significativa. Assim, mesmo que se forme uma fissura na camada externa, a camada de nacre pode retardar a falha e preservar a integridade da falha [24] [25].

Dentro da estrutura hierárquica do nacre, existem subcamadas de material mais fraco, denominadas por linhas de crescimento, que podem contribuir para uma melhoria no seu desempenho, atuando na mudança de direção das fissuras. Na microescala, a estrutura do nacre assemelha-se a uma parede de estrutura tijolo-argamassa tridimensional, onde os “tijolos” são organizados camada a camada na forma de placas poligonais (Fig.11) [27].

É de salientar que, as placas de nacre em conchas de abalone, ou haliote (género de moluscos gasterópodes marinhos, de concha univalve), e de outros gastrópodes estão dispostas em colunas (denominado nacre colunar), enquanto que em bivalves, como mexilhões ou ostras, estas estão dispostas de forma mais aleatória (denominado nacre de folha). É de notar que, o arranjo e o tamanho das placas de nacre são altamente uniformes por toda a camada [27].

Na Figura 11, pode observar-se a estrutura do nacre na mesoescala.

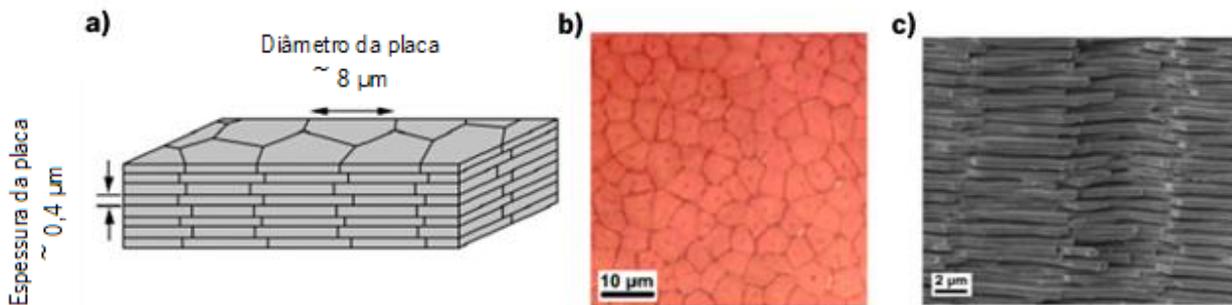


Figura 11. Estrutura do nacre na mesoescala [27]: a) Representação esquemática das placas de nacre; b) Vista superior das placas de nacre; c) Imagem de microscópica de uma superfície de fratura do nacre.

Uma das questões que tem vindo a ser debatida é se as placas de nacre são planas ou curvas. Segundo a maioria das publicações parece ser aceite que estas sejam planas. Contudo foi relatado por Barthelat e Espinosa que esta é ondulada na microescala, com um determinado ângulo (cauda de andorinha) θ , como se pode ver na Figura 12 [28].

Quando aplicada uma carga suficiente, as placas deslizam umas em relação às outras. Foi proposto que a ondulação, à microescala, na superfície das placas origina que a interface entre elas endureça à medida que se dá o deslizamento, propagando os danos e dissipando energia em áreas elevadas por forma a criar uma maior resistência [24].

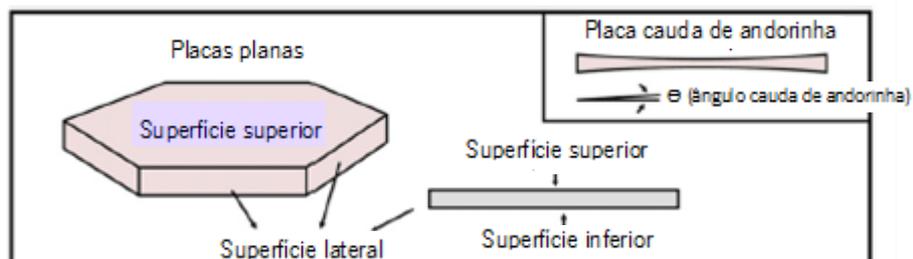


Figura 12. Morfologia de uma placa plana vista em perspetiva e vista em corte transversal [28].

Para além do mecanismo referido anteriormente, foram também propostos outros mecanismos, ativados durante o deslizamento, que geram resistência ao corte e ao endurecimento.

Um dos mecanismos é a existência de matéria orgânica resistente nas interfaces, permitindo uma forte adesão entre placas, sendo que algumas das moléculas contidas podem desdobrar-se sequencialmente sob tração, permitindo elevadas extensões e mantendo a coesão entre estas em longas distâncias de deslizamento [27].

Outro mecanismo é a existência de asperidade à nano-escala na superfície das placas, que podem interligar e aumentar a fricção durante o deslizamento, sendo proposto como fonte de resistência e endurecimento nas interfaces [27].

O terceiro mecanismo está associado a pontes minerais entre placas adjacentes, sendo que estas poderão atuar como reforços nas interfaces entre camadas. Contudo, dada a fragilidade da aragonite, estas não conseguirão produzir muita resistência ao deslizamento após a falha. Assim, após alguma distância de deslize, apesar de ainda não demonstrado, foi sugerido outro mecanismo, que consiste num novo contacto entre as pontes quebradas, levando assim ao rebloqueio das placas [24] [27].

Os mecanismos referidos anteriormente estão representados na Figura 13.

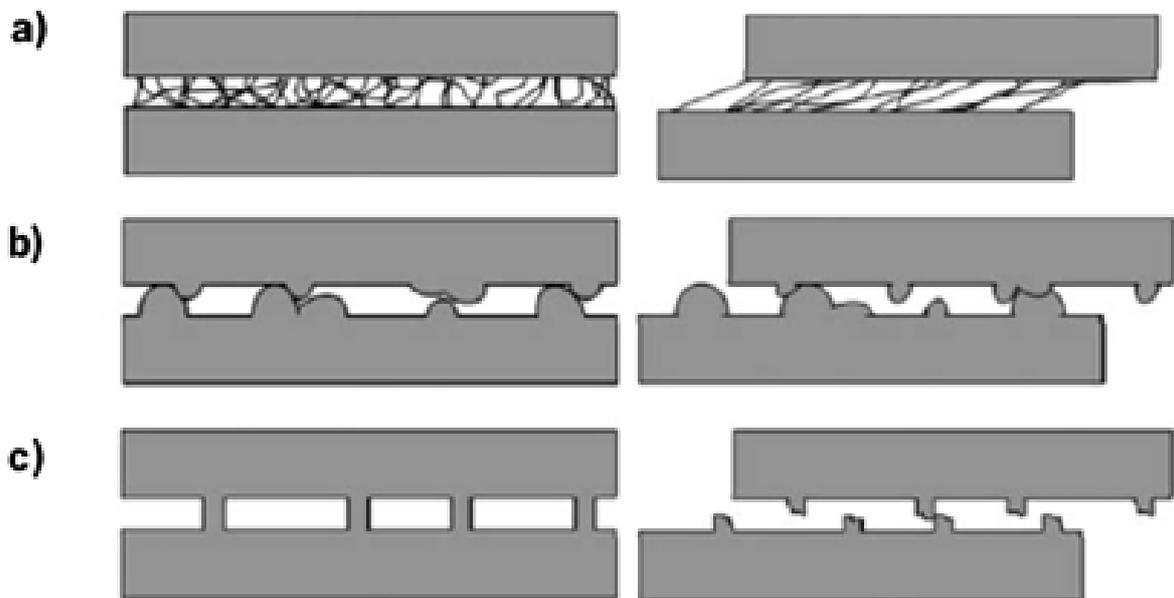


Figura 13. Mecanismos entre interfaces, que geram resistência ao cisalhamento e ao endurecimento [27]: a) Alongamento do biopolímero; b) Contato entre as asperidades na superfície das placas; c) Pontes minerais inicialmente intactas (à esquerda) e, potencial de rebloqueio após a quebra (direita).

Na Figura 14 é possível observar a presença de pontes minerais (Fig.14a) e nanoasperidades (Fig14b) na superfície das placas.

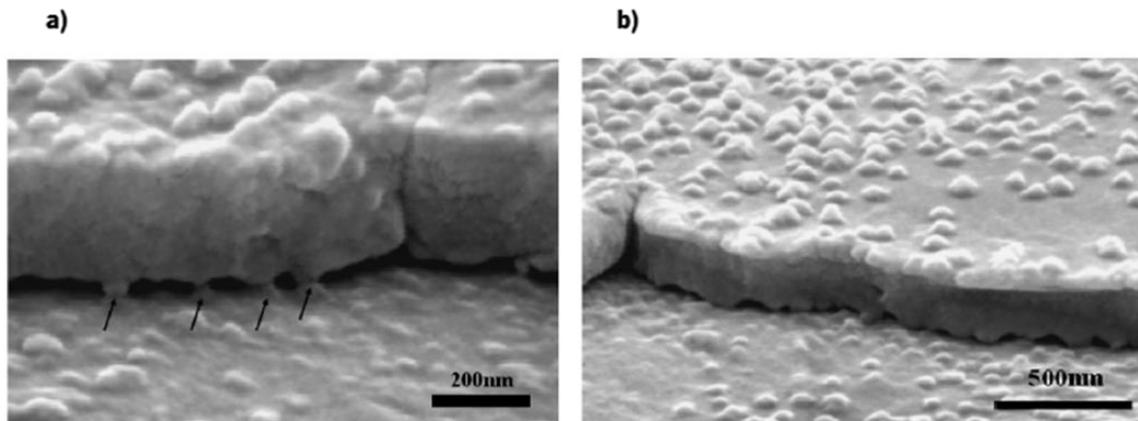


Figura 14. a) Exemplos de pontes minerais (indicadas pelas setas) e b) nanoasperidades na superfície de uma placa [15].

Na figura 15, está representada a estrutura hierárquica do nacre natural e de um composto bioinspirado, onde é possível ver a casca de abalone vermelho (Fig.15a), a micro/nanoestrutura do nacre natural (Fig.14b), onde para uma maior clareza, um conjunto de placas são delineadas a branco e a região em que o deslizamento ocorre é realçada a magenta (as setas indicam a direção) e também o composto artificial inspirado no nacre (Fig.14c), mostrando as placas antes da infiltração de polímero bem como pontes minerais entre as placas adjacentes [24].

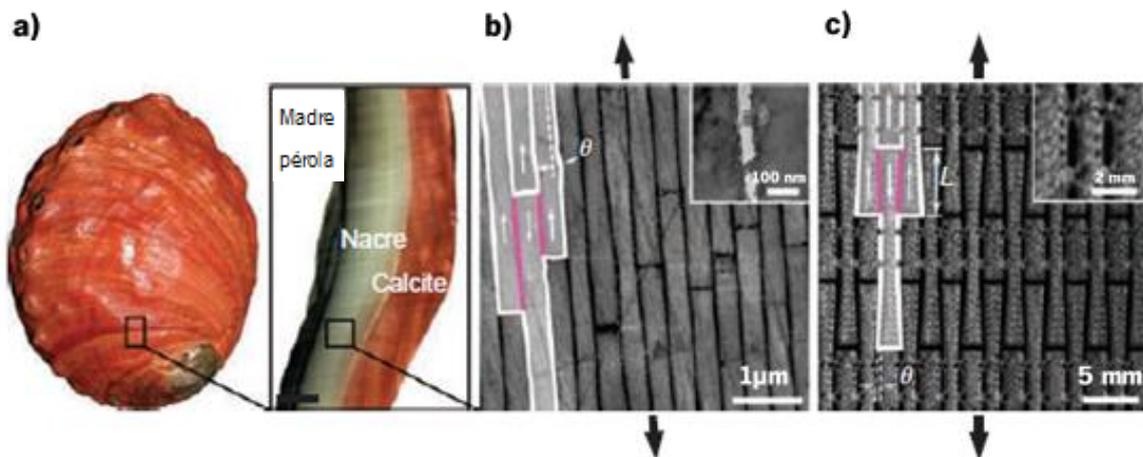


Figura 15. Estrutura hierárquica do nacre natural e composto bioinspirado [24]: a) Concha de abalone vermelha b) Microscopia eletrónica de varredura mostrando a micro / nanoestrutura do nacre natural. A inserção mostra uma imagem das pontes entre as placas. c) Composto artificial inspirado no nacre. A inserção mostra um detalhe das pontes entre placas.

- **Desempenho mecânico do nacre natural**

A Figura 16, resume a resistência do nacre relativamente à aplicação de forças em diferentes direções. Uma característica relevante é a maior resistência à compressão quando a força é aplicada perpendicularmente às placas, quando comparada à sua aplicação de forma longitudinal (540 MPa vs 235 MPa, respetivamente). Isto deve-se a fenómenos de divisão axial e torção quando a força é aplicada paralelamente às placas [29].

A diferença mínima existente na resistência à tração e compressão (170 MPa vs. 235 MPa, respetivamente) longitudinalmente às placas, deve-se à elevada tenacidade nesta direção, sendo possivelmente o resultado da existência de pontes minerais interligadas em combinação com a matéria orgânica nas interfaces [29].

Este conhecimento potencia a adequação da estrutura do nacre para aplicações em ambientes pressurizados, como, por exemplo, em submarinos [20].

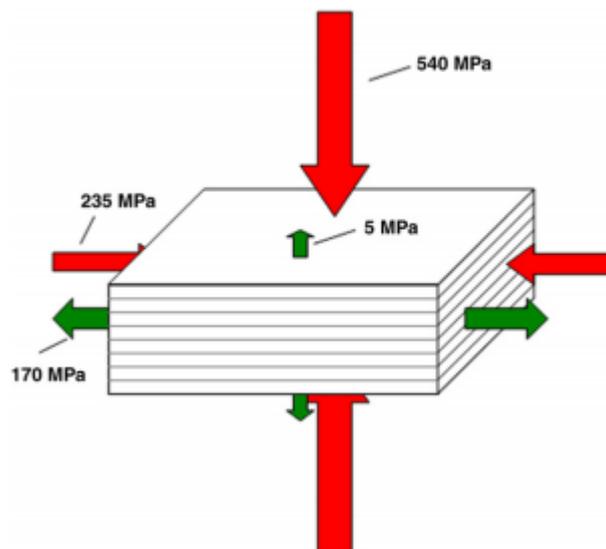


Figura 16. Resistência à tração e compressão do nacre sob diferentes direções de aplicação de carga [29].

- **Potencial da Impressão 3D na produção destas estruturas**

Para além dos esforços de investigação que têm sido dedicados a uma maior compreensão dos fundamentos teóricos dos compósitos mineralizados, existe um interesse crescente em mimetizar estes compósitos naturais para obter alternativas sintéticas com características mecânicas igualmente impressionantes [20].

Embora a natureza forneça modelos otimizados de estruturas para um melhor desempenho, as suas características hierárquicas exigem métodos de fabrico que vão muito além das capacidades apresentadas pelos métodos convencionais de fabrico.

Contudo, a impressão 3D tem vindo a receber muita atenção devido às múltiplas aplicações possíveis numa ampla gama de indústrias [21]. Este método tem a vantagem de poder fabricar peças com geometrias complexas, permitindo aos designers colocar seletivamente o material apenas onde é necessário, para além de permitir soluções multimaterial e com múltiplas escalas de comprimento, possibilitando assim a criação de estruturas inspiradas na natureza [20].

Tendo em conta os trabalhos de investigação e conclusões retiradas a partir do desempenho do nacre natural, foi já projetado um material hierárquico sintético (nacre artificial). A estrutura base deste compósito incorpora: endurecimento interfacial da placa através de uma estrutura em cauda de andorinha e a inclusão de pontes minerais entre as mesmas. As placas foram feitas a partir de ABS (material rígido) através da técnica de prototipagem rápida, FDM (Fused Deposition Modeling), sendo que o intervalo interfacial foi infiltrado com um epóxi flexível. As amostras de nacre artificial foram testadas em tensão para avaliar o seu desempenho e mecanismos de deformação, permitindo assim a sua comparação com o nacre natural. A principal conclusão retirada foi que o deslizamento das placas umas em relação às outras resulta num endurecimento induzido pela dilatação da interface, resultando num aumento da resistência [24].

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Geometria base/ Definição das dimensões

Nesta etapa foi necessário selecionar qual a geometria base a utilizar para a impressão de provetes com os pares de materiais selecionados, bem como definir as suas dimensões.

A estrutura deste compósito foi inspirada no nacre natural, integrando características importantes do mesmo, nomeadamente a ondulação com um determinado ângulo θ (cauda de andorinha) e a inclusão de pontes minerais entre placas adjacentes.

A geometria selecionada encontra-se representada na Figura 17.

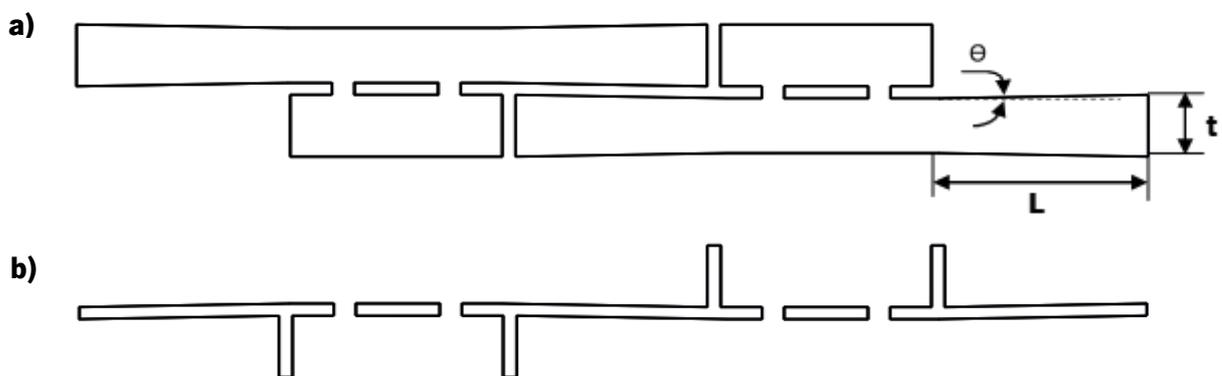


Figura 17. Representação da geometria selecionada. a) Estrutura tijolo-argamassa; b) Interface entre as placas.

Espinosa et al, que fabricou e testou amostras artificiais com diferentes ângulos de cauda de andorinha, mostrou que com um ângulo $\theta = 0^\circ$ e um dado comprimento de cauda de andorinha L , se verificou um endurecimento insignificante após o deslizamento e um pico de tensão relativamente baixo devido à falta de um mecanismo de endurecimento interfacial. Contudo, com um ângulo de cauda de andorinha $\theta = 1^\circ$ (mantendo-se o mesmo comprimento, L), verificou-se um endurecimento interfacial significativo após o início do deslizamento. Para ângulos maiores que $\theta = 1^\circ$, o endurecimento interfacial foi superior ao das próprias placas, observando-se assim uma quebra frágil das mesmas [24].

Desta forma, o ângulo usado para a estrutura selecionada foi de $\theta=1^\circ$.

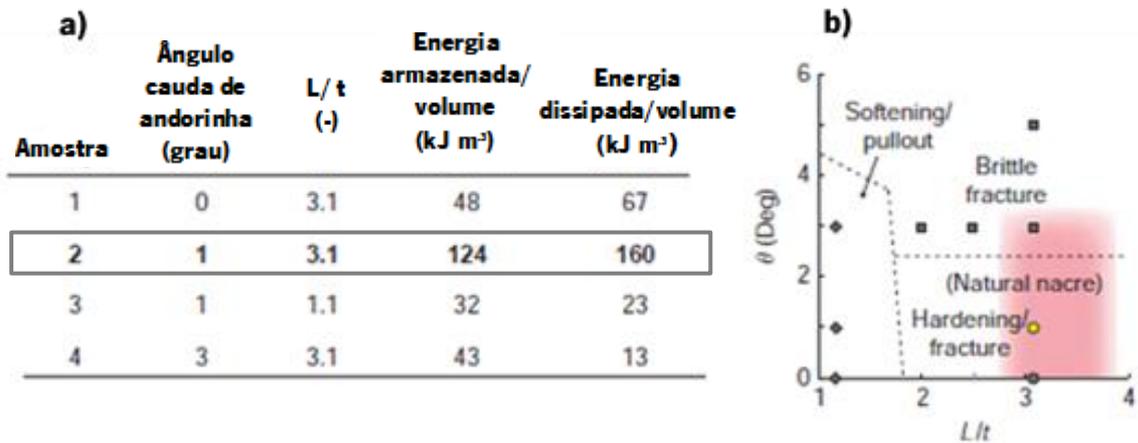


Figura 18. Dados relativos à avaliação do desempenho do composto de ABS- epóxi baseado na estrutura do nacre a) Tabela que mostra as energias armazenadas e dissipadas normalizadas para amostras de geometria variável; b) Mapa dos modos de falha, relacionando o ângulo de cauda de andorinha com o comprimento L [24].

A partir das relações obtidas na Figura 18 e de uma espessura normalizada, $t = 1,85$ mm [29], foi possível obter as restantes dimensões para a estrutura que se pretende obter. Através do gráfico b), verifica-se que a relação L/t para o nacre natural se encontra sensivelmente entre 2,75 e 4 [30].

Assim, com uma espessura de $t = 1,85$ mm e uma relação de $\frac{L}{t} = 3,1$ (obtida para o valor de $\theta = 1^\circ$), têm-se um comprimento de cauda de andorinha, $L = 5,7$ mm. O valor da espessura da zona central do elemento rígido estrutura foi obtido da seguinte forma:

$$1,85 - (5,7 \tan 1^\circ) \times 2 = 1,64 \text{ mm}$$

Inicialmente era prevista uma espessura das interfaces entre placas de 0,30 mm, contudo como o diâmetro mínimo possível da fiação a utilizar seria de 0,15 mm, obtendo-se assim uma largura de extrusão mínima de cada camada de 0,18 mm, apenas foi possível utilizar uma espessura de interface com 0,36 mm.

Na Figura 19 encontram-se representadas todas as dimensões correspondentes à estrutura.

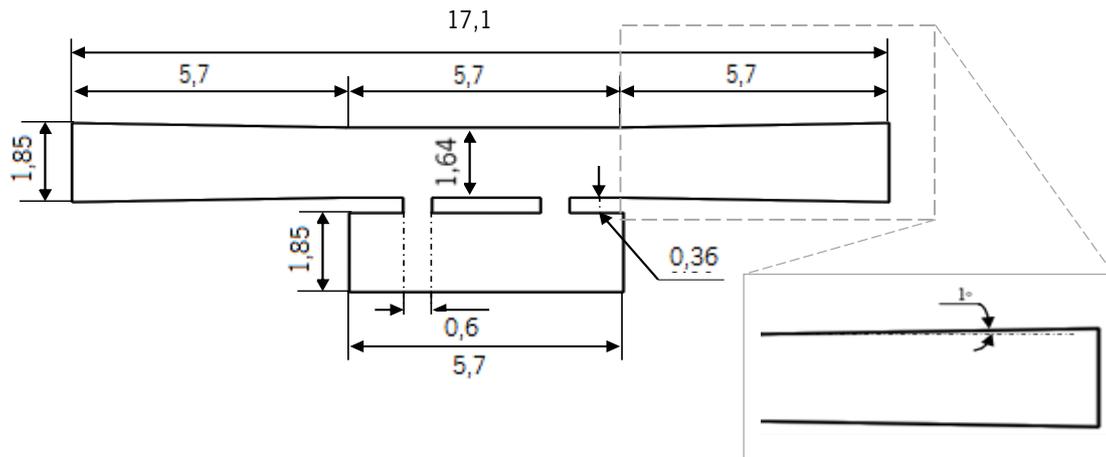


Figura 19. Representação das dimensões da estrutura base (mm)

3.2. Materiais e Condições de impressão

• Materiais

No processo FFF, são maioritariamente utilizados dois tipos de materiais termoplásticos, o ABS e o PLA. Contudo, ultimamente a quantidade de materiais que podem ser utilizados tem vindo a crescer. Este tipo de materiais tem propriedades diferentes dos convencionais, podendo acrescentar mais valias aos produtos que se pretendem obter.

Tendo em consideração o tipo de estrutura que se pretende criar, nomeadamente a produção de uma lâmina rígida com inclusões flexíveis para sustentar a propagação de fissuras, foram inicialmente selecionados dois materiais rígidos e dois flexíveis:

- PC
- G6-Impact (HIPS, reforçado com fibras de carbono e grafeno)
- Flex 45
- Ninjaflex

O policarbonato (PC) é um termoplástico muito rígido e resistente com elevada resistência ao impacto e boa resistência ao fogo [31].

O G6-Impact é um filamento composto por uma matriz HIPS, reforçado com fibra de carbono e grafeno. Neste filamento procura-se, portanto, conjugar rigidez com um certo grau de flexibilidade, e um

desempenho excepcional no amortecimento ao choque e vibração. Este novo material para a impressão em 3D FFF nasceu para ocupar um vazio que ainda não foi encontrado em materiais industriais, como materiais com alta resistência e bom amortecimento ou absorção ao impacto [31].

O filamento Flex 45, é um material constituído por TPC, que para além da sua flexibilidade apresenta também uma boa resistência mecânica a ataques químicos e temperaturas extremas, tendo também bastante durabilidade e uma excelente resistência aos raios UV [32].

O Ninjaflex, é um material constituído por TPU, que para além da sua elevada flexibilidade, apresenta uma resistência química a muitos materiais, resistência à abrasão e uma boa capacidade de alongação [33].

- **Condições de impressão**

Por forma a determinar qual a temperatura adequada a usar na impressão com cada material, variou-se a temperatura de impressão e a temperatura da cama de deposição, mantendo-se inalterados os restantes parâmetros. Para tal foram impressas duas estruturas diferentes para cada material.

A primeira consistiu numa estrutura quadrada oca, de 20 mm de altura por 20 mm de lado, contendo apenas uma parede fina [ver Figura 20 a)]. Com esta estrutura pôde-se avaliar qual a temperatura que possibilitava uma melhor adesão do material à cama, permitindo também encontrar uma temperatura que fosse adequada aos pares de materiais.

A segunda estrutura impressa foi uma torre quadrada com 50 mm de altura e 10 mm de lado [ver Figura 20 b)], e tinha o intuito de permitir determinar a temperatura de impressão mais adequada. Utilizando a temperatura de deposição determinada a partir da estrutura anterior, avaliou-se o acabamento superficial da mesma, aumentando-se a temperatura de impressão em 10° C, de 10 mm em 10 mm.

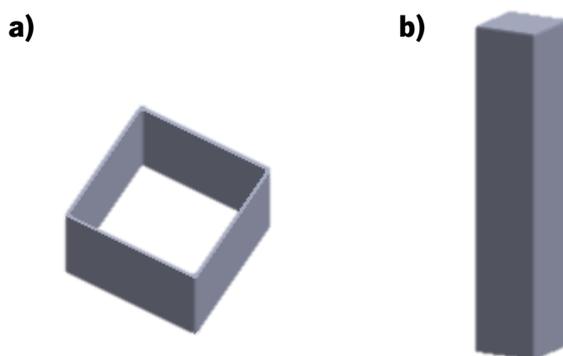


Figura 20. Estruturas usadas na determinação da temperatura de impressão: (a) 1ª estrutura; (b) 2ª estrutura.

Por último, e por forma a avaliar a compatibilidade entre os pares de materiais, recorreu-se a uma terceira estrutura, com 5 mm de altura, 20 mm de largura e 40 mm de comprimento [ver Figura 21]. Esta estrutura era dividida em duas partes, sendo que nos primeiros 2.5 mm era impresso um material e nos seguintes outro.

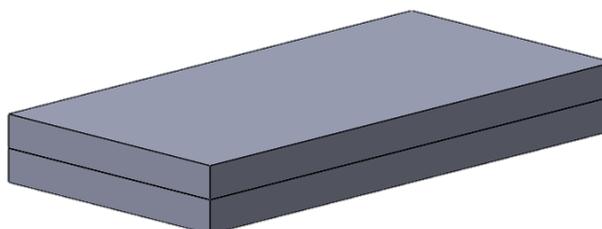


Figura 21. Estrutura usada para determinar a compatibilidade dos pares de materiais.

Através da metodologia descrita anteriormente, foi possível concluir que apenas se poderiam utilizar dois dos materiais anteriormente referidos, o G6-Impact (material rígido) e o Flex 45 (material flexível), pois no que diz respeito aos outros dois materiais foram encontradas dificuldades que impossibilitavam o processo. Assim, relativamente ao PC verificou-se uma grande dificuldade na adesão deste à cama de deposição; no caso do Ninjaflex o enrolamento do filamento no extrusor impossibilitou a sua correta extrusão.

A temperatura de impressão de cada material, bem como as combinações de materiais utilizadas na impressão dos provetes encontra-se na Tabela 1. A temperatura da cama de deposição selecionada para todos os materiais foi de 95°C.

Tabela 1. Temperatura de impressão usada nos pares de materiais

Pares de materiais	Temperatura (° C)
G6-Impact	230
Flex 45	265
G6-Impact	230
G6-Impact	230
G6-Impact	230

Os parâmetros de impressão fixos usados encontram-se discriminados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de impressão fixos

Extrusora	A¹	B²
Diâmetro da feira (mm)	0,40	0,15
Multiplicador de extrusão	0.90	1
Largura de extrusão	0,48	0,18
Camadas		
Altura da primeira camada (mm)	0,28	0,14
Número de camadas sólidas superiores	0	3
Número de camadas sólidas inferiores	0	2
Número de perímetros	22	2
Enchimento		
Enchimento (%)	100	100
Orientação do enchimento	45/-45	0/60/-60
Velocidade de Impressão		
Velocidade de impressão (mm/s)	30	25
Velocidade de movimento do eixo X/Y (mm/s)	60	60
Velocidade de movimento do eixo Z (mm/s)	3	3

3.3. Provetes

Os provetes utilizados foram desenhados através de um software CAD, nomeadamente o *Solidworks*, e seguidamente impressos segundo a técnica FFF. Para cada ensaio foram produzidos três provetes com as combinações de materiais referidas anteriormente.

¹ Parâmetros utilizados para a impressão das placas

² Parâmetros utilizados para a impressão das interfaces

- **Provete de Tração**

Os provetes de tração foram produzidos de acordo com as dimensões nominais da norma ASTM D 638 – 02a. Na Figura 22 encontram-se as dimensões dos provetes de tração de referência e híbridos.

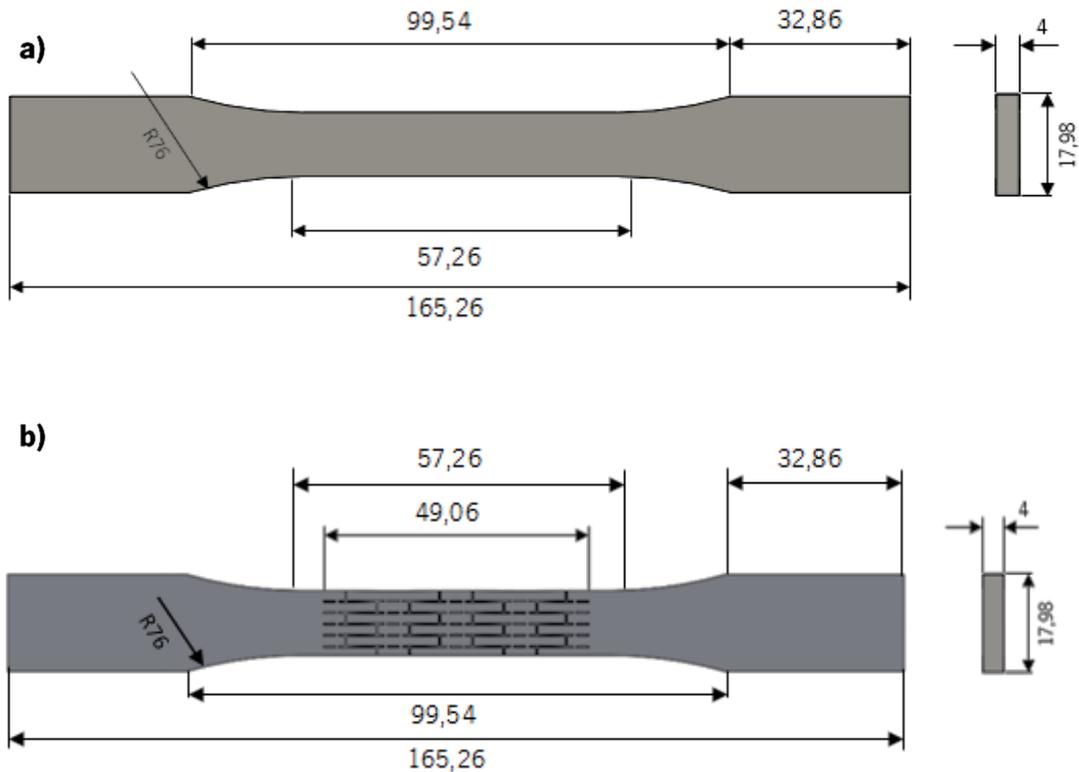


Figura 22. Dimensões do provete de tração a) Provete de referência b) Provete híbrido (escala em mm).

No anexo I encontram-se os provetes impressos para os pares de materiais G6-Impact/Flex 45, G6-Impact / G6-Impact e apenas com o material G6-Impact, respetivamente.

- **Provete de Flexão**

Os provetes de flexão impressos foram dimensionados segundo a norma ASTM D790. Segundo esta norma deverá utilizar-se uma proporção entre o comprimento e a espessura do provete de 16:1. Neste caso a espessura considerada para o provete foi de 6,15 mm.

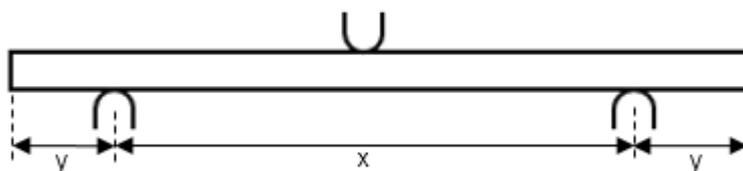


Figura 23. Representação esquemática do ensaio de flexão.

Durante o ensaio de flexão, a amostra foi colocada no topo de ambos os apoios como representado Figura 23. Por forma a evitar que a amostra deslize ao longo de ambos os suportes, esta deve ser suficientemente comprida. Assim deverá existir um comprimento adicional, para lá dos apoios, em cada extremidade, de pelo menos 10 % relativamente à distância entre apoios, ou seja, $y = 0,1 * x$. [34]

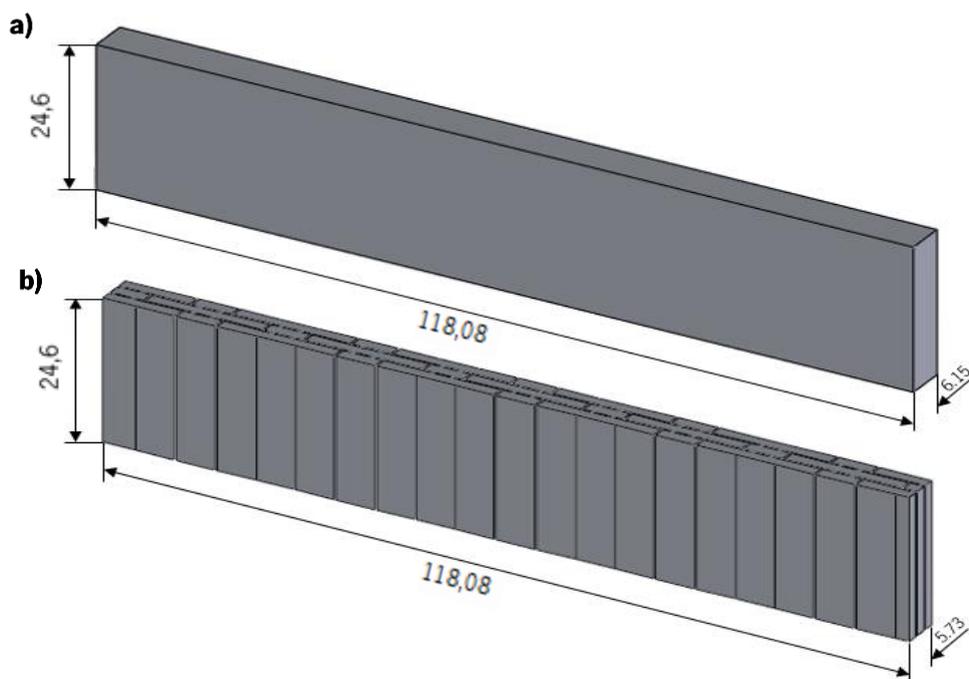


Figura 24. Dimensões dos provetes de flexão. a) Provete de referência; b) Provete híbrido (escala em mm).

Segundo o gráfico da Figura 17 b) verifica-se que a relação L/t para o nacre natural se encontra aproximadamente entre 2,75 e 4 [30]. Desta forma usando um rácio de $\frac{L}{t} = 4$, pode então determinar-se a largura do corpo de prova. Nas imagens seguintes encontram-se as dimensões dos provetes de flexão (de referência e híbridos).

Ao longo da espessura, as estruturas foram colocadas por forma a que existisse uma simetria entre as mesmas. Assim sendo, como é possível observar na Figura 24, a espessura do provete de referência tornou-se ligeiramente diferente da espessura do provete híbrido.

No anexo I encontram-se os provetes impressos para os pares de materiais G6-Impact/Flex 45, G6-Impact / G6-Impact e apenas com o material G6-Impact, respetivamente.

- **Provete de Impacto**

Relativamente aos provetes de impacto as medidas seleccionadas são as que se encontram na Figura 25.

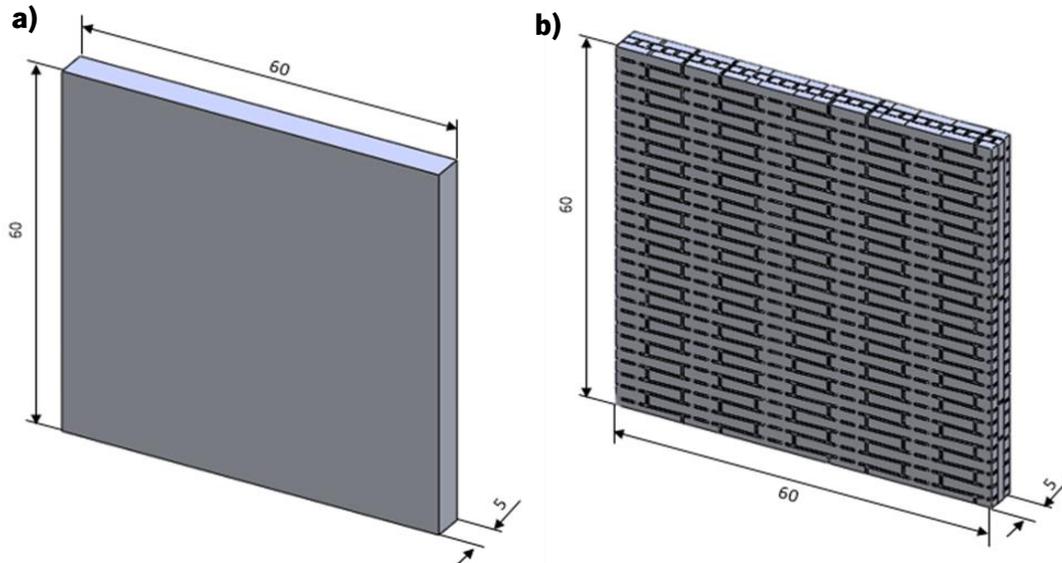


Figura 25. Dimensões dos provetes de impacto. a) Provete de referência; b) Provete híbrido (escala em mm).

No anexo I encontram-se os provetes impressos para os pares de materiais G6-Impact/Flex 45, e apenas com o material G6-Impact, respetivamente. Relativamente ao par G6-Impact/ G6-Impact, não foi possível a sua impressão. O facto de a feira usado ter um diâmetro muito reduzido (0,15 mm) e o material ser carregado (com fibras de carbono e grafeno), originou a obstrução muito frequente da feira.

4. ENSAIOS MECÂNICOS

4.1. Condições de Ensaio

- **Ensaio de Tração**

Num ensaio de tração, um corpo de prova ou provete é submetido a um esforço que tende a alongá-lo até à rotura. Para a maioria dos ensaios realizados, na zona inicial do teste, a relação entre a força aplicada e o alongamento que a amostra exhibe é linear. Nessa região linear, o material obedece à Lei de Hooke, havendo proporcionalidade entre a tensão (σ) aplicada ao material e a deformação (ϵ)

produzida. Quando esta tensão (σ) é retirada, o corpo recupera completa e instantaneamente a sua forma inicial.

$$\sigma = E\varepsilon, \text{ onde } E \text{ é o } \mathbf{m\acute{o}dulo \text{ de } Young}. \quad (1)$$

A tensão é determinada pela equação (2), onde F corresponde à força aplicada (N) e A à área da secção transversal do provete, e a deformação (ε) pela equação (3) em que ΔL corresponde ao alongamento e l_0 à distância entre amarras.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} \quad (3)$$

Para a realização dos ensaios de tração utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 5969, testando-se 3 provetes para cada tipo de amostra. Os ensaios foram realizados com extensómetro. Os parâmetros de tração usados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros usados no ensaio de tração.

Velocidade de tração (mm/min)	5
Distância entre amarras (mm)	100

Relativamente à velocidade de tração utilizada esta foi relativamente baixa, pois é o mais recomendado quando se trata de compósitos.

Na Figura 26 encontra-se o equipamento utilizado no ensaio de tração.



Figura 26. Equipamento utilizado no ensaio de tração

- **Ensaio de Flexão**

O ensaio de flexão consiste numa barra de secção transversal retangular que repousa sobre dois apoios, sendo seguidamente aplicada uma força no centro do provete. A força é efetuada através de um punção. Durante o ensaio a amostra está sob tensão de tração na superfície convexa e tensão de compressão na superfície côncava.

Através dos dados recolhidos, força exercida e deslocamento resultante, é possível obter um gráfico de tensão [MPa] – deformação [%]. Os valores da tensão e deformação são calculados da seguinte forma, respetivamente:

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (4)$$

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;

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

Onde:

ε = deformação sob flexão, mm/mm;

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

L = distância entre apoios, mm;

d = espessura do corpo de prova, mm;

Os resultados do teste incluem os valores da força máxima, da deflexão máxima e do módulo de flexão, sendo este último uma indicação quantitativa da rigidez de um material quando este é fletido [35].

Para a realização dos ensaios de flexão utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 5969, testando-se 3 provetes para cada tipo. Os parâmetros usados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros usados no ensaio de flexão.

Velocidade de flexão (mm/min)	5
Espaçamento entre os pontos de apoio (mm)	98,4

Na Figura 27 encontra-se o equipamento utilizado no ensaio de flexão.

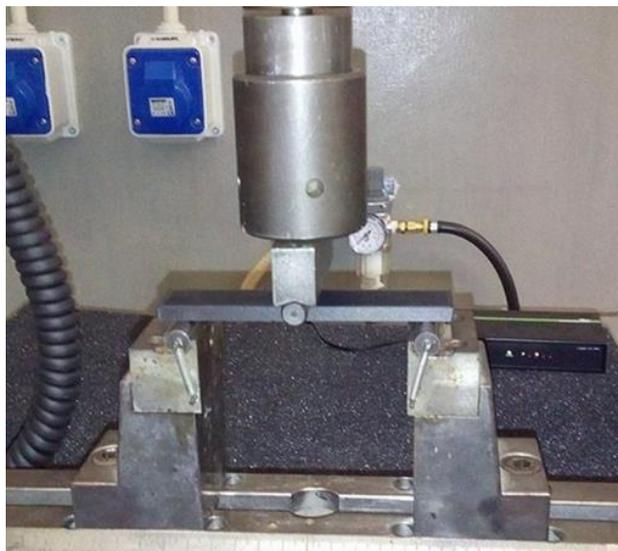


Figura 27. Equipamento utilizado no ensaio de flexão

- **Ensaio de Impacto**

O ensaio de impacto por queda de dardo instrumentado consiste em libertar um peso verticalmente sobre um corpo de prova. Este ensaio testa a capacidade de um objeto resistir ao impacto de uma carga elevada, determinando a energia absorvida na fratura de um corpo de prova submetido a um impacto a alta velocidade.

A energia disponível utilizada para o teste deve ser tal, de modo que a desaceleração da velocidade não seja superior a 20% desde o início do teste até ao ponto de pico (máximo) de carga [35].

Os testes de impacto instrumentados fornecem detalhes completos do ensaio, desde o contato inicial até à falha final da amostra, registando a curva força (N) / tempo (ms), permitindo desta forma obter os valores da velocidade (m/s), deslocamento (mm) e energia (J).

Para a realização dos ensaios de impacto utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos FRACTOVIS PLUS, testando-se 3 provetes para cada tipo. Os parâmetros usados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros usados no ensaio de impacto.

Velocidade (m/s)	4,4
Altura (m)	1
Massa (kg)	5,045

Energia (J)	49,5
Frequência (kHz)	250
Tempo de teste (ms)	20
Diâmetro do impactador (mm)	20

*Por forma a se poder aumentar o tempo de ensaio alterou-se a frequência de aquisição de dados de 500 KHz para 250 KHz.

Na Figura 28 encontra-se o equipamento utilizado no ensaio de impacto.



Figura 28. Equipamento utilizado no ensaio de impacto

4.2. Resultados do Ensaio de Tração

Na Figura 29 encontra-se um gráfico com as curvas tensão-deformação correspondentes aos ensaios de tração realizados para um dos provetes de cada combinação de materiais.

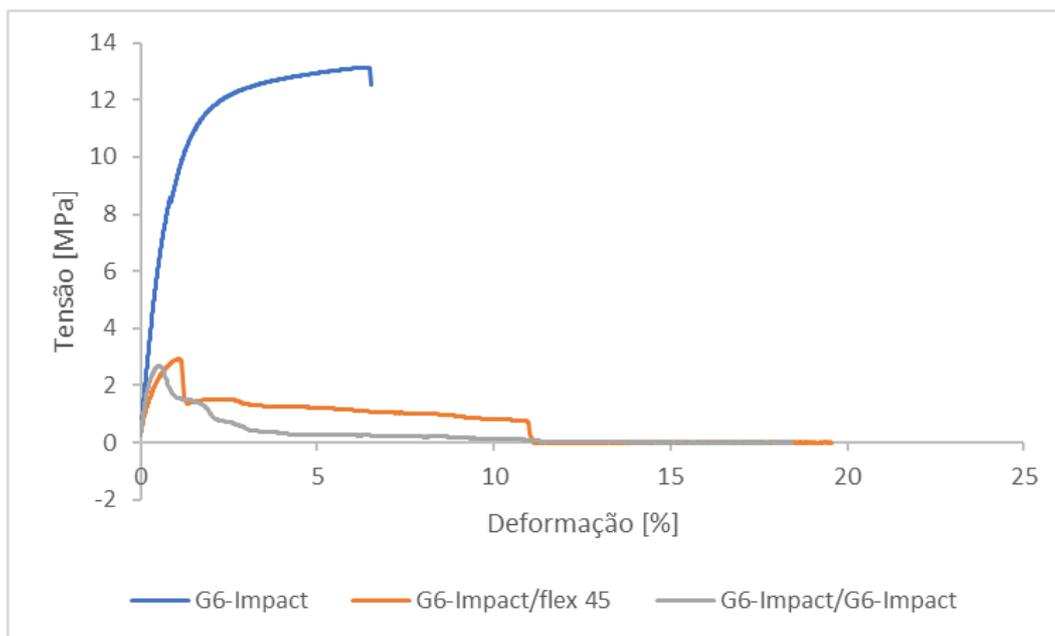


Figura 29. Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração para um provete de cada combinação de materiais.

Na tabela 6, encontram-se representados os resultados das propriedades determinadas após a realização dos ensaios de tração, nomeadamente os valores médios da tensão de cedência, tensão de rotura e módulo de Young.

Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de tração

	Tensão de cedência (Mpa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de Young
G6-Impact	12,833 ± 2,529	8,917 ± 7,729	735,063 ± 196,540
G6-Impact / Flex 45	2,643 ± 0,235	0,005 ± 0,011	600,473 ± 55,862
G6-Impact / G6-Impact	2,707 ± 0,441	0,005 ± 0,011	1130,113 ± 521,461

Na Figura 30 encontram-se dois gráficos que permitem obter uma melhor perceção em termos de comparação entre os valores médios representados na tabela anterior para as diferentes combinações de materiais.

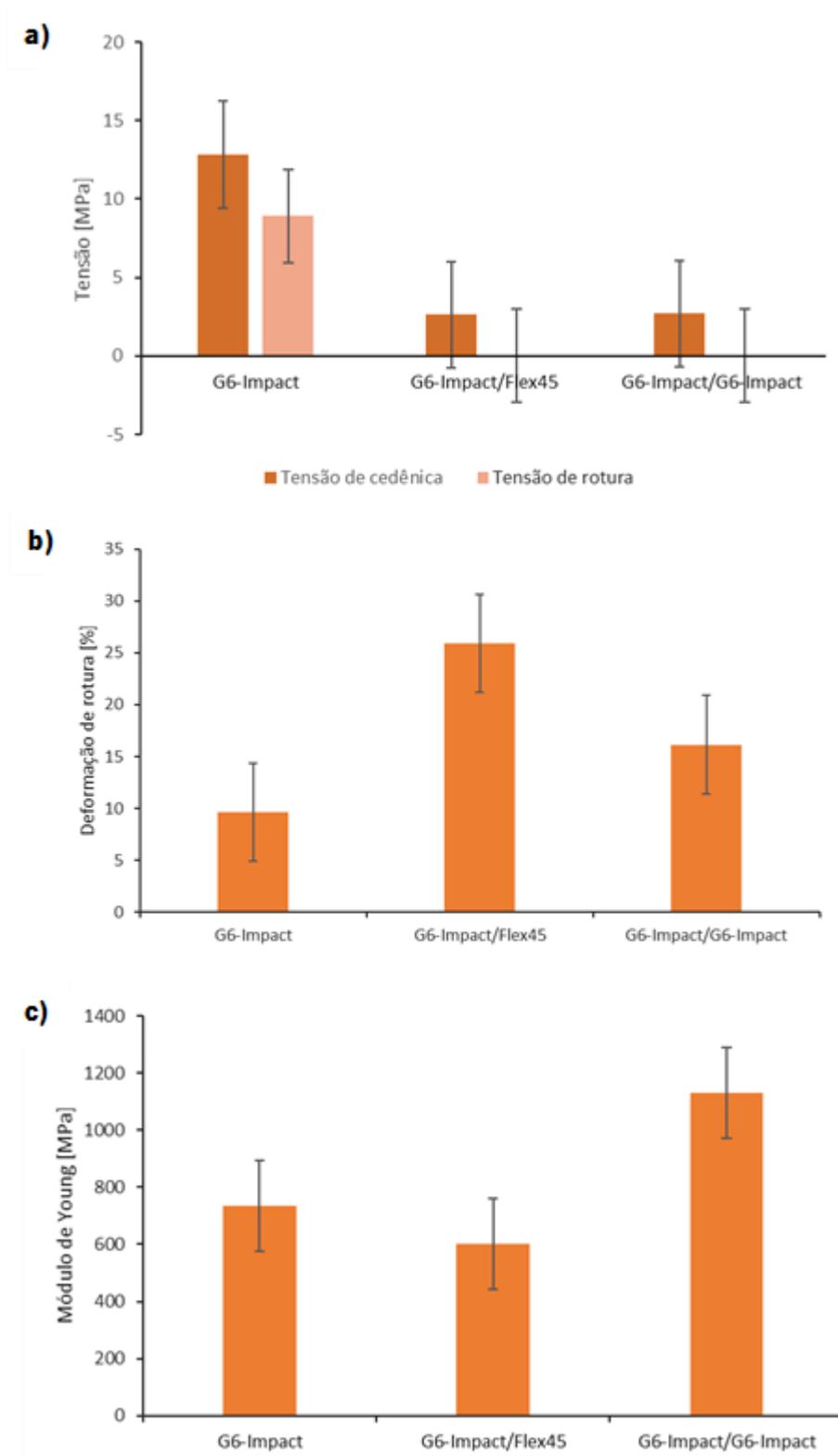


Figura 30. Resultados obtidos no ensaio de tração: a) Tensão de cedência / Tensão de rotura; b) Deformação de rotura; c) Módulo de Young

Através dos dados anteriores é possível observar que o valor da tensão de cedência e tensão de rotura dos provetes impressos unicamente com G6-Impact é bastante superior à dos provetes compostos

pelas estruturas técnicas, ou seja quando sujeitos a estímulos de tração é necessário uma tensão maior para que haja a rotura.

A diferença entre os resultados obtidos pode ser explicada pela forma como foram impressos os provetes com as estruturas, uma vez que alguns destes fraturaram pela zona das amarras, como se pode ver na Figura 31. Enquanto que nos provetes impressos apenas com uma cabeça de extrusão a impressão é realizada de forma contínua não havendo alteração da sequência de deposição, nos provetes compostos por G6-Impact/Flex 45 e G6-Impact/G6-Impact isso não acontece, uma vez que inicialmente cada uma das camadas começava a ser impressa pelas extremidades (zona das amarras) e só depois a zona interior do provete (zona do pescoço).

Outra das razões que poderá ter levado a estes resultados poderá ser a qualidade de impressão que irá afetar o desempenho mecânico das estruturas técnicas impressas, como iremos ver mais à frente através da análise microscópica dos provetes, uma vez que em algum destes se dá a separação (existem vazios) entre as interfaces da geometria tijolo-argamassa.

No gráfico da Figura 29, analisando e comparando as curvas dos provetes ensaiados com a estrutura tijolo-argamassa, é possível verificar que os provetes impressos com os materiais G6-Impact/Flex 45 quando sujeitos a estímulos de tração necessitam que lhe seja aplicada uma tensão maior para que haja a rotura até uma deformação de aproximadamente 11%.

Na Figura 31, é possível observar os provetes de tração após o ensaio.

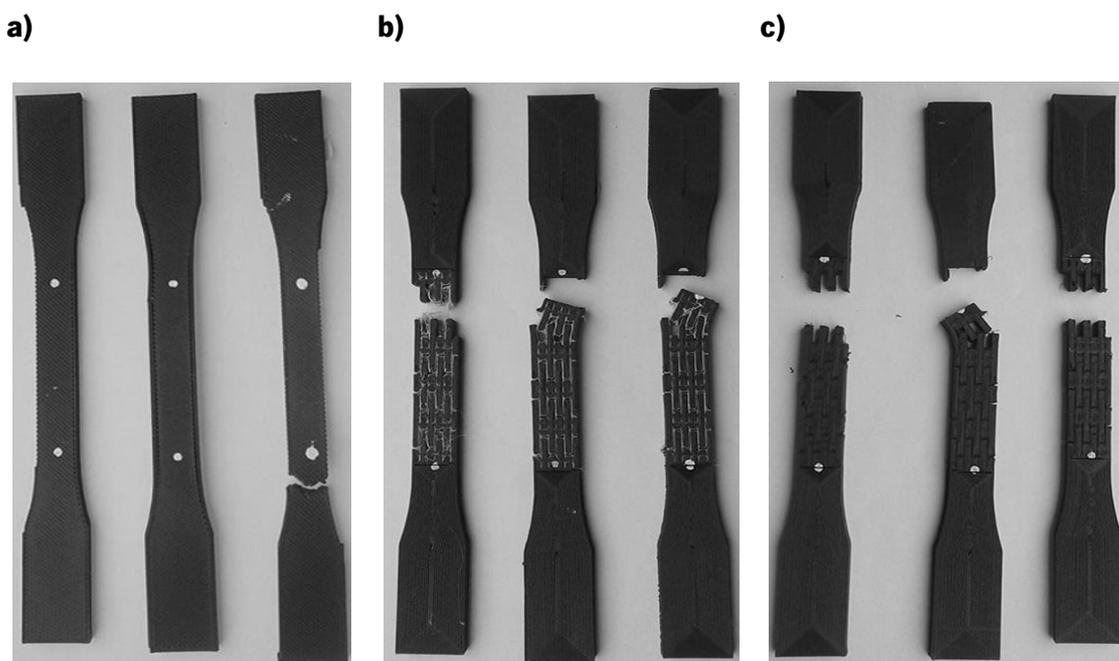


Figura 31. Provetes após o ensaio de tração; a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/G6-Impact

Analisando as imagens da figura 31 e os vídeos realizados aquando o ensaio de tração, parece observar-se uma melhor “ligação” nos provetes compostos por G6-Impact/ Flex 45 do que nos compostos por G6-Impact/ G6-Impact que pura e simplesmente parecem desencaixar.

4.3. Resultados do Ensaio de Flexão

Na Figura 32 encontra-se um gráfico com as curvas tensão-deformação correspondentes aos ensaios de flexão realizados para um dos provetes de cada combinação de materiais, para facilitar a sua comparação.

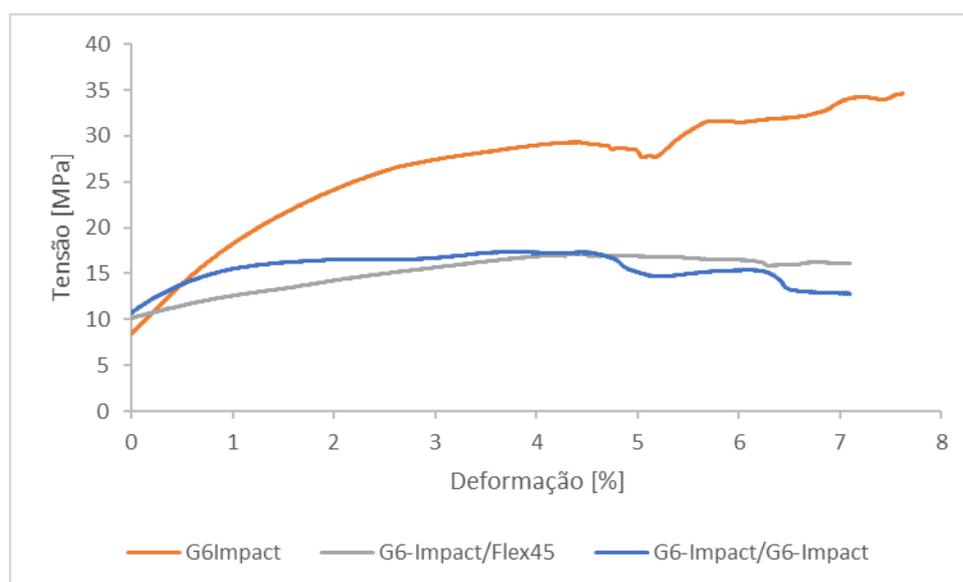


Figura 32. Curva Tensão x Deformação do ensaio de flexão para um provete de cada combinação de materiais

Na Tabela 7 encontram-se os resultados obtidos após os ensaios de flexão realizados aos provetes.

Tabela 7. Resultados obtidos no ensaio de flexão

	Força máxima (N)	Deflexão máxima (mm)	Módulo à flexão (MPa)
G6-Impact	214,634 ± 8,306	41,305 ± 10,770	1091,399 ± 106,338
G6-Impact / Flex 45	93,403 ± 8,381	25,411 ± 0,175	212,656 ± 77,245
G6-Impact / G6-Impact	105,409 ± 9,579	33,505 ± 9,927	621,076 ± 62,576

Tal como se pode observar através das propriedades obtidas após o ensaio, o provete impresso apenas com G6-Impact é o que obtém melhores resultados à flexão, ou seja, quando sujeitos a estímulos

de flexão os provetes impressos por uma só cabeça de extrusão conseguem suportar forças de flexão superiores aos outros provetes testados.

Através do gráfico da Figura 32, quando comparada a curva cinza (G6-Impact/Flex 45) com a curva azul (G6-Impact/G6-Impact), é possível concluir que a introdução do material Flex 45 forneceu uma maior elasticidade ao provete, daí ser visível um comportamento quase linear até aproximadamente 4% de deformação.

Tal como acontece nos ensaios de tração e como se pode ver na figura 33, os provetes que continham as estruturas fraturaram na zona das interfaces da geometria tijolo-argamassa.

No gráfico da Figura 32, foram considerados apenas valores de deformação até aproximadamente 8%, pois para deformações superiores, na curva correspondente ao ensaio do provete sem as estruturas técnicas eram visíveis algumas oscilações resultantes do escorregamento das amostras ao longo dos apoios, uma vez que estas se encontravam simplesmente apoiadas, sendo esse escorregamento visível através dos vídeos realizados aquando o ensaio facilitando assim chegar a esta conclusão. Desta forma, reconheceu-se que seria inadequado considerar as curvas resultantes do ensaio de flexão a partir do momento em que os provetes já não se encontravam apoiados como inicialmente.

Na Figura 33, é possível observar os provetes de flexão após o ensaio.

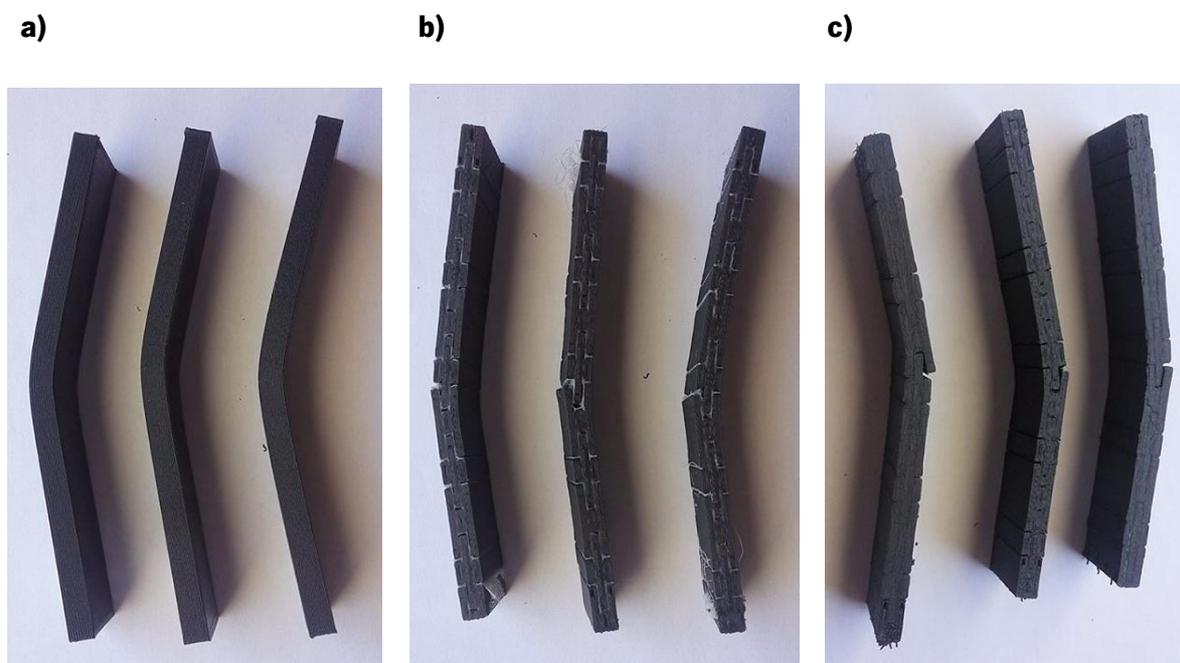


Figura 33. Provetes após o ensaio de flexão; a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/G6-Impact

4.4. Resultados do Ensaio de Impacto

Na Figura 34 encontram-se os gráficos correspondentes aos ensaios de impacto realizados, que incluem as curvas de força-deflexão dos provetes testados.

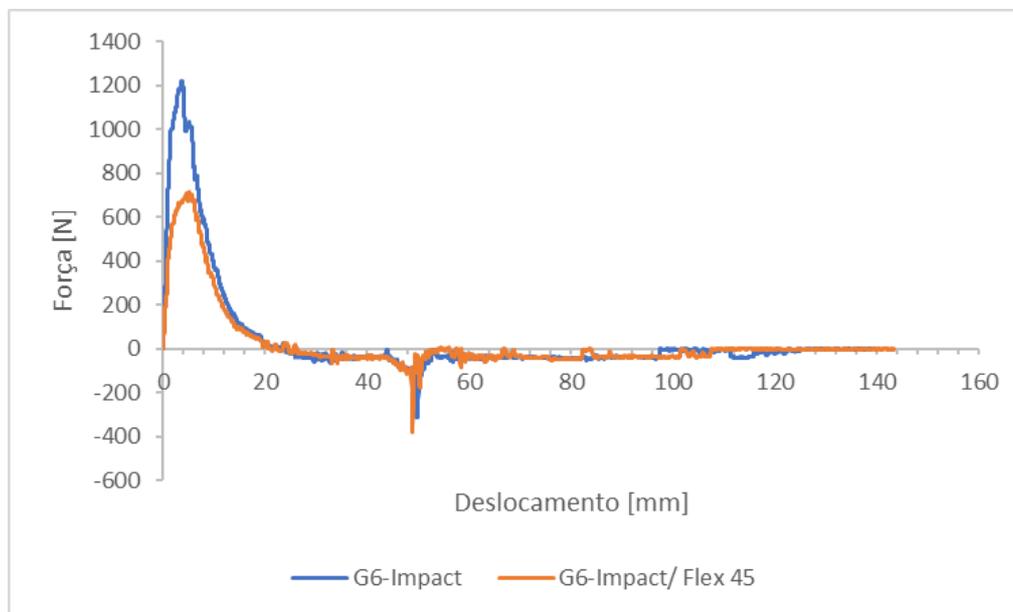


Figura 34. Curva Força x Deslocamento do ensaio de impacto para um provete de cada combinação de materiais.

Na tabela 8 encontram-se os resultados obtidos após os ensaios de impacto realizados aos provetes.

Tabela 8. Resultados obtidos no ensaio de Impacto

	Força máxima (N)	Deflexão na força máxima (mm)	Energia na força máxima (J)	Deflexão do punção (mm)	Energia do punção (J)
G6-Impact	1148,871 ± 81,251	3,562 ± 0,248	3,014 ± 0,273	7,165 ± 0,477	6,159 ± 0,605
G6-Impact / Flex 45	719,305 ± 14,476	4,643 ± 0,415	2,477 ± 0,272	8,716 ± 0,753	4,710 ± 0,262

A figura 35 representa a forma como se obtêm os valores de deflexão do punção, (l_p) e da energia do punção, (E_p) segundo a norma EN ISO 6603-2: 2000.

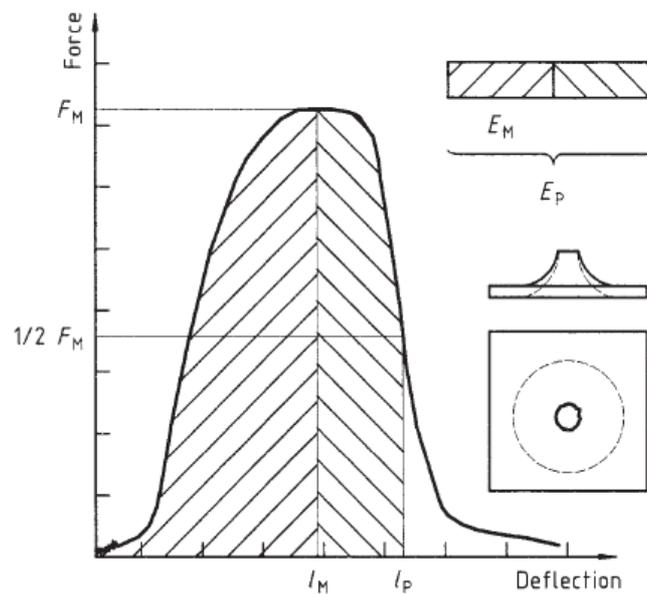


Figura 35. Exemplo de um gráfico Força x Deflexão [36]

Através dos valores obtidos na Tabela 8, e tal como aconteceu nos outros ensaios mecânicos, o provete de G6-Impact possui melhores características mecânicas do que o provete de G6-Impact/Flex 45.

No gráfico da Figura 34 é possível observar determinados picos em ambos os provetes, sendo que provavelmente estes se devem à propagação da fratura ao longo das várias camadas dos mesmos.

Na Figura 36 é possível observar os provetes após o ensaio de impacto.

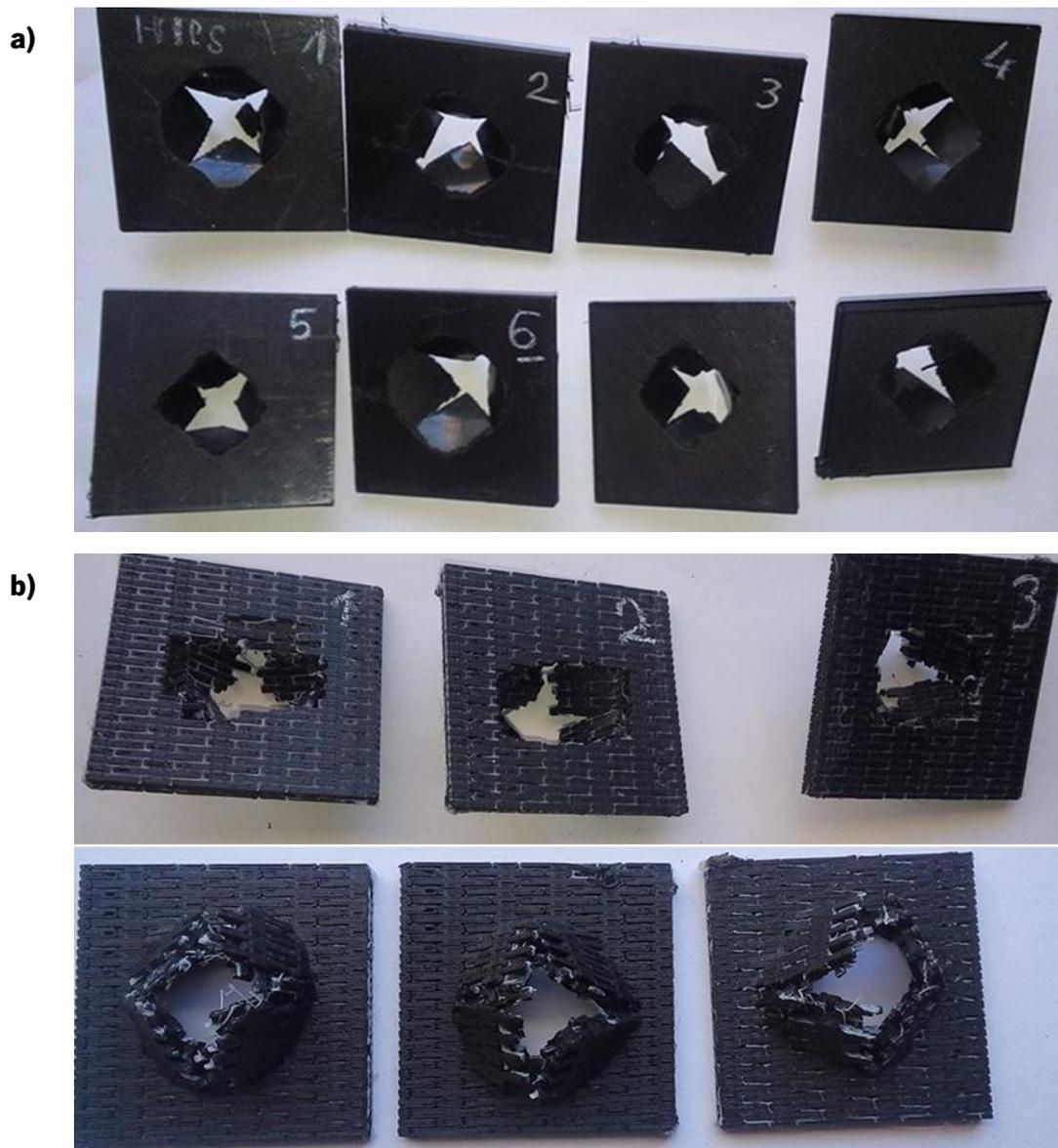


Figura 36. Provetes após o ensaio de impacto: a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45.

4.5. Análise Global

Após a realização dos ensaios mecânicos foi possível verificar que os resultados obtidos não vão de encontro ao que era expectável, uma vez que era de esperar que os provetes impressos com as estruturas técnicas (geometria tijolo-argamassa) tivessem um ótimo desempenho mecânico comparativamente aos provetes impressos apenas com G6-Impact, por forma a satisfazer os objetivos para que foram desenvolvidas.

Através da análise dos ensaios foi possível verificar que estes fraturam através das interfaces. Pode-se especular que uma das razões que poderia estar na origem dessa fratura seria a

incompatibilidade entre materiais, caso não se testassem provetes com a combinação G6-Impact/G6-Impact, que sendo constituídos pelo mesmo material (impresso por duas cabeças de extrusão) teriam uma ótima adesão entre as interfaces, colocando assim de parte esta possibilidade.

Assim, e por forma a tentar entender a origem destes resultados, recorreu-se à análise das estruturas impressas com a ajuda de uma lupa estereoscópica da Olympus e de uma câmara digital Leica como se pode ver na Figura 37.

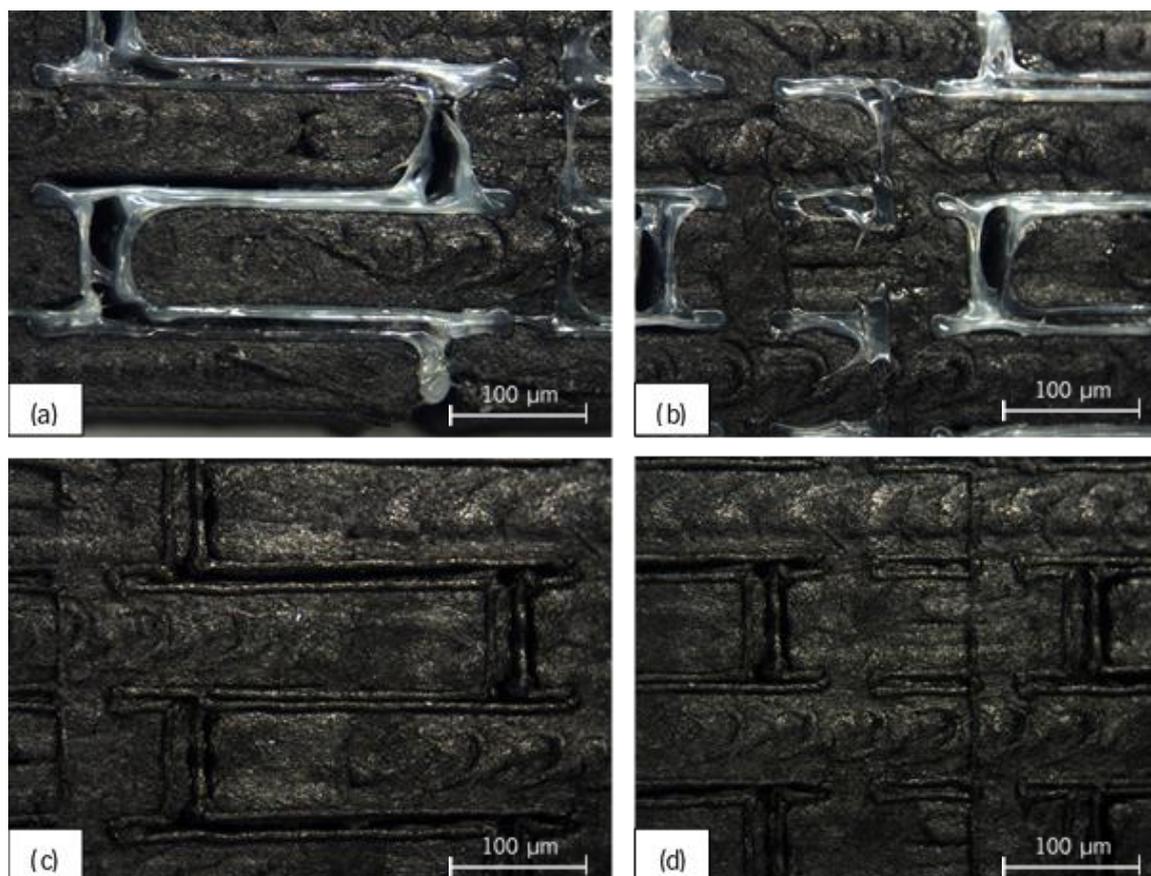


Figura 37. Imagem microscópica dos provetes; a) e b) G6-Impact/Flex 45; c) e d) G6-Impact/G6-Impact;

Através da análise das imagens anteriores é possível observar bastantes espaços vazios nas zonas de interface, nomeadamente zonas com falhas de impressão, que afetaram visivelmente o desempenho mecânicos destas estruturas. Estes vazios tornam a região mais frágil, pois não há uma ligação física entre as estruturas, fazendo com que esta seja uma zona mais propensa à fratura.

No que diz respeito ao ensaio de tração, e ao que já foi discutido anteriormente relativamente à fratura na zona das amarras (resultante da forma como os provetes eram impressos), também foi possível observar a existência de vazios entre a zona das amarras e a zona central do provete (pescoço) (Fig.38).

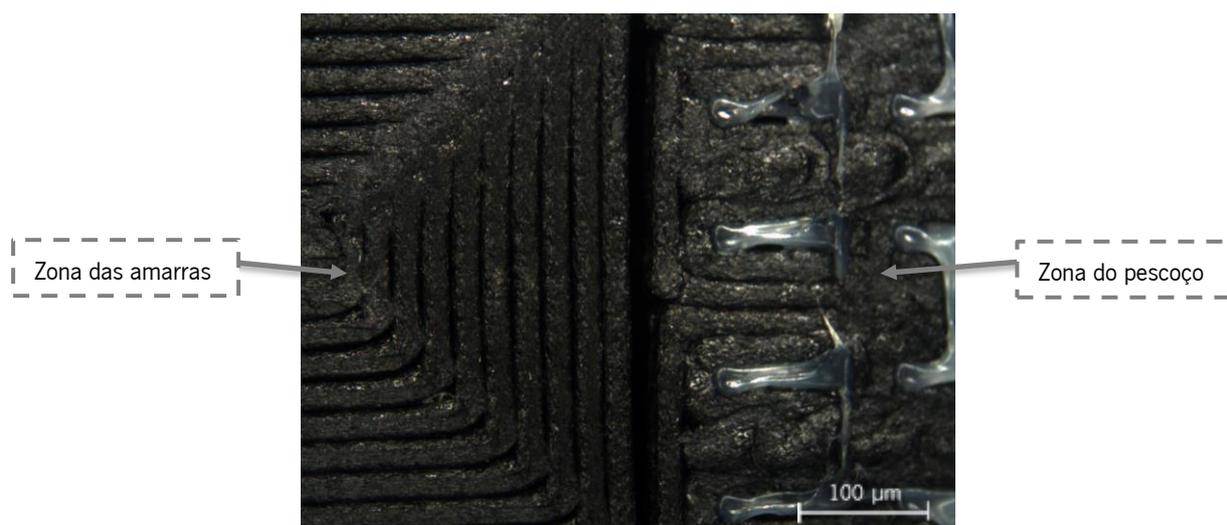


Figura 38. Imagem microscópica do provete impresso

Por forma a verificar, se o defeito poderia estar também na dimensão reduzida das estruturas, procedeu-se à impressão de uma estrutura com dimensões superiores às seleccionadas e seguidamente analisou-se a mesma com a lupa estereoscópica. Contudo, e como se pode ver na Figura 39, verificaram-se o mesmo tipo de falhas que se observavam nos provetes com as dimensões normais.

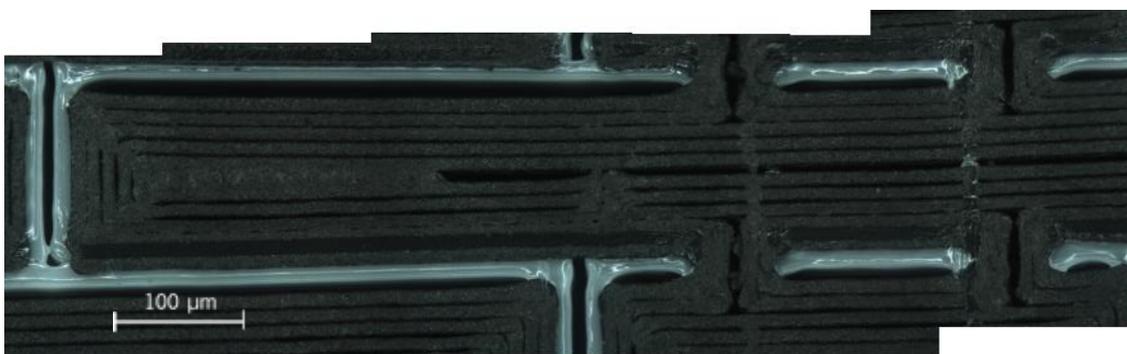


Figura 39. Imagem microscópica do provete impresso com dimensões ampliadas

Assim, após esta análise microscópica pode-se concluir que o fator determinante que afetou o desempenho mecânico das estruturas foi a qualidade de impressão relativamente fraca.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo desta dissertação foi avaliar o potencial do processo de impressão FFF multi-material, para a produção de estruturas técnicas a incorporar em compósitos laminados, mais concretamente a estrutura do nacre, que se assemelha a uma parede de estrutura tijolo-argamassa tridimensional.

Inicialmente, começou por se realizar uma pesquisa bibliográfica sobre compósitos laminados e as estruturas que se pretendem produzir, focando-a essencialmente na estrutura do nacre, o que permitiu seguidamente definir requisitos/especificações das estruturas a desenvolver e produzir no âmbito do trabalho, tais como a geometria, respetivas dimensões e definição das metodologias a usar para a sua caracterização.

A estrutura deste compósito inspirado no nacre natural agrega características importantes do mesmo, nomeadamente a ondulação com um determinado ângulo θ (cauda de andorinha) e a inclusão de pontes minerais entre placas adjacentes.

Realizada toda a pesquisa bibliográfica, recorreu-se ao programa *Solidworks* por forma a desenhar a geometria selecionada, bem como os provetes para os respetivos ensaios mecânicos.

Seguidamente, procedeu-se à escolha do par de materiais a utilizar, sendo estes o G6-Impact por ser considerado um filamento rígido com um certo grau de flexibilidade e um desempenho excecional no amortecimento do choque e vibração, e o Flex 45, um material que para além da sua flexibilidade apresenta também uma boa resistência mecânica a ataques químicos e temperaturas extremas, tendo também bastante durabilidade. Inicialmente pretendia usar-se o PC e o NinjaFlex, mas devido a problemas associados à sua impressão não foi possível. Assim as combinações selecionadas para estas estruturas foram: G6-Impact; G6-Impact/Flex 45; G6-Impact/G6-Impact.

Posteriormente, e após a determinação das condições de impressão, foram impressos os provetes com as estruturas. Aquando a impressão das mesmas, surgiram bastantes adversidades que dificultaram o processo, nomeadamente:

- i. dificuldades relacionadas com a calibração tanto a nível da cama de deposição como dos extrusores;
- ii. enrolamento do filamento Flex 45 ao longo do extrusor devido aproximação em demasia do extrusor à cama de deposição;
- iii. e falhas de impressão associadas à obstrução da feira.

Posto isto procedeu-se à caracterização mecânica, através de ensaios de tração, flexão e impacto. No que diz respeito aos ensaios de tração, verificou-se que os valores de tensão de cedência e de rotura nos provetes impressos unicamente com G6-Impact (sem as estruturas) são bastante superiores aos dos provetes compostos pelas estruturas técnicas, sendo que estes fraturavam através das interfaces ou pela zona das amarras devido à alteração na sequência de impressão. Contudo, analisando o gráfico que continha as curvas dos ensaios realizados para um provete de cada combinação de material, e comparando os provetes que continham as estruturas técnicas, foi possível verificar que até uma deformação de aproximadamente 11%, os provetes impressos com G6-Impact/Flex 45 necessitavam que lhes fosse aplicada uma tensão superior para que houvesse rotura relativamente aos provetes impressos com G6-Impact/G6-Impact.

Relativamente aos ensaios de flexão, observou-se que quando sujeitos a estímulos de flexão, os provetes impressos apenas com G6-Impact conseguem suportar forças de flexão superiores aos outros provetes testados. Por último, no ensaio de impacto, e apesar de não existir tanta diferença entre os resultados obtidos como nos outros ensaios, constatou-se mais uma vez que os provetes impressos com as estruturas tinham desempenho mecânico mais fraco do que os provetes normais.

Posto isto, e por forma a tentar perceber a origem destes resultados, recorreu-se à análise das estruturas impressas com a ajuda de uma lupa estereoscópica e uma câmara digital. Através dessa análise, observaram-se bastantes vazios nas zonas de interface, nomeadamente zonas com falhas de impressão, que desta forma afetaram o desempenho mecânico destas estruturas. No que diz respeito aos provetes de tração, também se observaram vazios na transição da zona das amarras e a zona central do provete (pescoço), resultantes da forma como estes foram impressos.

Desta forma, pode-se concluir que as estruturas técnicas concebidas baseadas no nacre natural não satisfizeram os objetivos para que foram desenvolvidas, uma vez que os provetes que as continham mostraram um desempenho mecânico bastante mais fraco do que os provetes normais, sendo que o principal fator responsável foi o facto de não haver qualidade na impressão.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

Devido ao fraco desempenho das estruturas técnicas produzidas ficam aqui registadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionadas com este tema:

- No que diz respeito à impressora seria importante otimizar o processo de calibração e certificar-se que esta não irá descalibrar aquando a impressão.

- Rever a estratégia de impressão dos provetes de tração para melhorar o seu desempenho mecânico.
- Selecionar outros materiais ou pares de materiais.
- Estudar e incluir nas estruturas as formas poligonais incorporadas na estrutura do nacre que são referidas em alguns artigos.

REFERÊNCIAS

- [1] “Pacheco-Torgal, F., and S. Jalali, 2011c, *Materiais biomiméticos: materiais de construção inspirados na natureza: Revista Arte & Construção* 240, p. 38-40.,” pp. 38–40.
- [2] A. R. Studart, “Towards high-performance bioinspired composites,” *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 37, pp. 5024–5044, 2012.
- [3] M. A. Meyers, P. Chen, A. Y. Lin, and Y. Seki, “Biological materials: Structure and mechanical properties,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 1–206, 2008.
- [4] M. A. Meyers, A. Y. M. Lin, Y. Seki, P. Y. Chen, B. K. Kad, and S. Bodde, “Structural biological composites: An overview,” *Jom*, vol. 58, no. 7, pp. 35–41, 2006.
- [5] W. G. Bae, H. N. Kim, D. Kim, S. H. Park, H. E. Jeong, and K. Y. Suh, “25th anniversary article: Scalable multiscale patterned structures inspired by nature: The role of hierarchy,” *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 5, pp. 675–699, 2014.
- [6] E. Arzt, “Biological and artificial attachment devices: Lessons for materials scientists from flies and geckos,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 26, no. 8, pp. 1245–1250, 2006.
- [7] P. Y. Chen *et al.*, “Structural biological materials: overview of current research,” *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 60, no. 6, pp. 23–32, 2008.
- [8] F. P. Torgal and S. Jalali, “Materiais biomiméticos : materiais de construção inspirados na natureza,” *Revista Arte e Construção*, Março de 2011.
- [9] A. Rinaldi, “Naturally Better,” *Eur. Mol. Biol. Organ. Reports*, vol. 8, no. 11, pp. 995–999, 2007.
- [10] M. A. Meyers, P. Y. Chen, M. I. Lopez, Y. Seki, and A. Y. Lin, “Biological materials: a materials science approach,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 4, no. 5, pp. 626–657, 2011.
- [11] P. H. Niewiarowski, A. Y. Stark, and A. Dhinojwala, “Sticking to the story: outstanding challenges in gecko-inspired adhesives,” *J. Exp. Biol.*, vol. 219, no. 7, pp. 912–919, 2016.
- [12] W. Zhang, J. Gu, Q. Liu, H. Su, T. Fan, and D. Zhang, “Butterfly effects: novel functional materials inspired from the wings scales,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 37, pp. 19767–80, 2014.
- [13] Z. Han *et al.*, “An Ingenious Super Light Trapping Surface Templated from Butterfly Wing Scales,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 10, no. 1, p. 1052, 2015.
- [14] Z. Han *et al.*, “Biomimetic multifunctional surfaces inspired from animals,” *Adv. Colloid Interface*

- Sci.*, vol. 234, no. April, pp. 27–50, 2016.
- [15] P. Y. Chen, J. McKittrick, and M. A. Meyers, “Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs,” vol. 57, no. 8, pp. 1492–1704, 2012.
- [16] F. Xia and L. Jiang, “Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials,” *Adv. Mater.*, vol. 20, no. 15, pp. 2842–2858, 2008.
- [17] U. G. K. Wegst *et al.*, “Bioinspired structural materials,” *Nat. Mater.*, vol. 14, no. 1, pp. 23–36, 2014.
- [18] Logoplaste, *Slide apresentado nas Jornadas Polímeros 2017*, Junho de 2017.
- [19] A. R. Studart, “Additive manufacturing of biologically-inspired materials,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 45, no. 2, pp. 359–376, 2016.
- [20] G. X. Gu *et al.*, “Three-Dimensional-Printing of Bio-Inspired Composites,” *J. Biomech. Eng.*, vol. 138, no. February, pp. 1–16, 2016.
- [21] L. S. Dimas, G. H. Bratzel, I. Eylon, and M. J. Buehler, “Tough composites inspired by mineralized natural materials: Computation, 3D printing, and testing,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 36, pp. 4629–4638, 2013.
- [22] G. Mayer, “Rigid Biological Systems as Models for Synthetic Composites,” *Source Sci. New Ser.*, vol. 310178101, no. 5751, pp. 1144–1147, 2005.
- [23] F. Barthelat, “Biomimetics for next generation materials.,” *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1861, pp. 2907–2919, 2007.
- [24] 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.”, vol. 2, no. 2, p. 173, 2011.
- [25] F. Barthelat, H. Tang, P. D. Zavattieri, C. M. Li, and H. D. Espinosa, “On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 55, no. 2, pp. 306–337, 2007.
- [26] K. Parratt and N. Yao, “Nanostructured Biomaterials and Their Applications,” *Nanomaterials*, vol. 3, no. 2, pp. 242–271, 2013.
- [27] H. D. Espinosa, J. E. Rim, F. Barthelat, and M. J. Buehler, “Merger of structure and material in nacre and bone - Perspectives on de novo biomimetic materials,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 8, pp. 1059–1100, 2009.
- [28] J. Xu and G. Zhang, “Unique morphology and gradient arrangement of nacre’s platelets in green mussel shells,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 52, pp. 186–193, 2015.

- [29] P.Y. Chen, "Structure and mechanical properties of selected biological materials.," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 208–26, 2008.
- [30] J. Wang, Q. Cheng, and Z. Tang, "Layered nanocomposites inspired by the structure and mechanical properties of nacre," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, no. 3, pp. 1111–1129, 2012.
- [31] "Filament2print." [Online]. Available: <https://filament2print.com/pt/pc-policarbonato/661-pc-policarbonato.html>, [Acesso: 21 de Setembro de 2017].
- [32] "Dutch Filaments." [Online]. Available: <http://www.dutchfilaments.com/flex-45-filament/>, [Acesso: 21 de Setembro de 2017].
- [33] "NinjaTek." [Online]. Available: <https://ninjatek.com/products/filaments/ninjaflex/>, [Acesso: 21 de Setembro de 2017].
- [34] ASTM, "D790-03-Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials," *ASTM Stand.*, pp. 1–11, 2015.
- [35] "Design and production of instruments and apparatus for quality control of materials." [Online]. Available: https://www.inteszt.hu/products/attachments/kis-fractovis-plus-gb-ap7520-01pdf_arSgjNVOKT.pdf, [Acesso: 26 de Setembro de 2017].
- [36] En, "Iso 6603-2:2000 - Standard Test Methods for Determination of puncture impact behaviour of rigid plastics - Part 2: Instrumented impact testing ", pp.1-23, 2002.

ANEXOS

Anexo I – Provetes Impressos

Ensaio mecânico: Tração

Pares de materiais: G6-Impact/Flex 45, G6-Impact/ G6-Impact, G6-Impact (respetivamente)

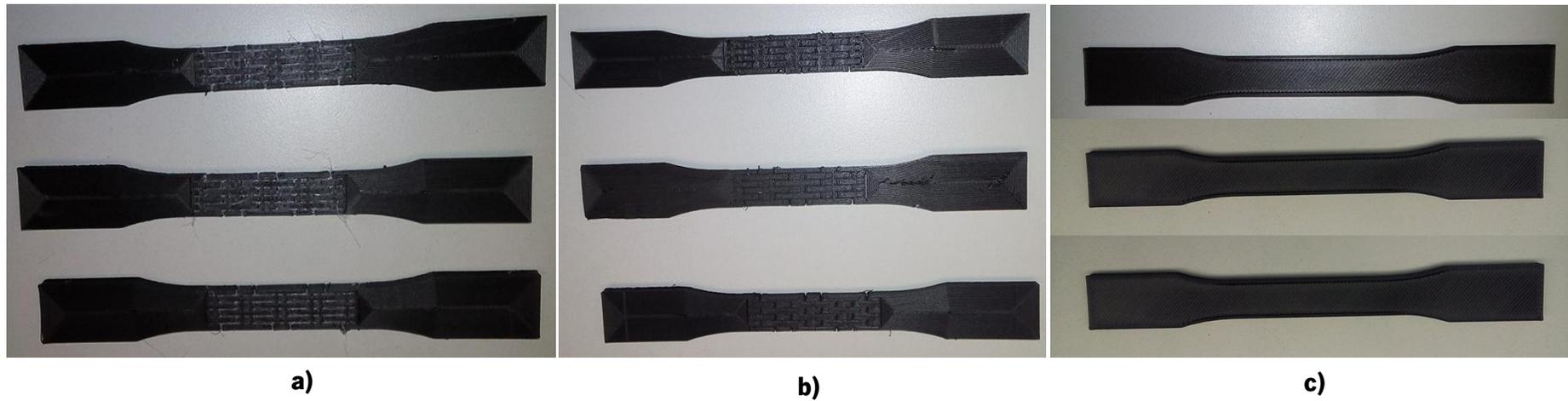


Figura 40. Provetes de tração impressos. a) G6-Impact/Flex 45; b) G6-Impact/G6-Impact/; c) G6-Impact

Ensaio mecânico: Flexão

Pares de materiais: G6-Impact / Flex 45, G6-Impact / G6-Impact, G6-Impact (respetivamente)

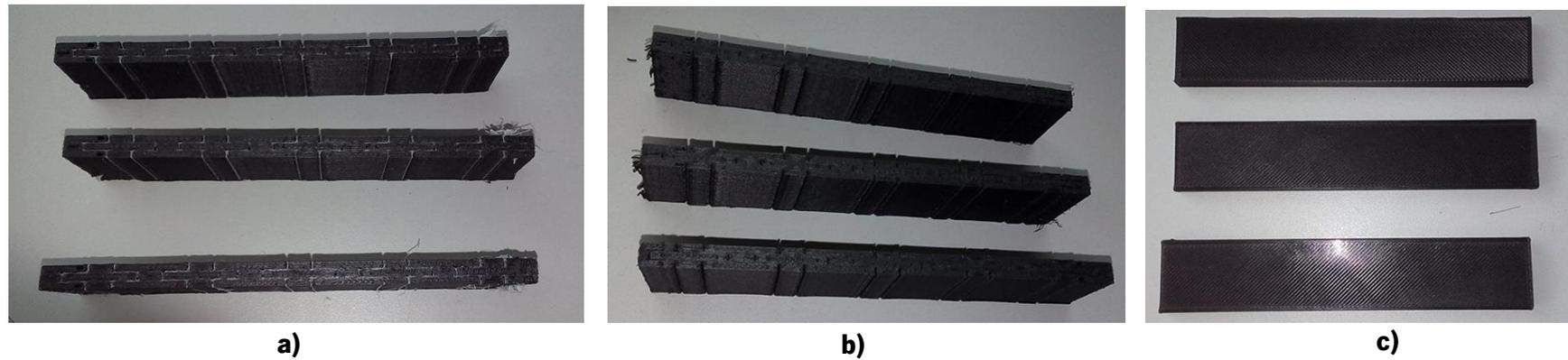


Figura 41. Provetes de flexão impressos. a) G6-Impact/Flex 45; b) G6-Impact/G6-Impact/; c) G6-Impact

Ensaio mecânico: Impacto

Pares de materiais: G6-Impact / Flex 45

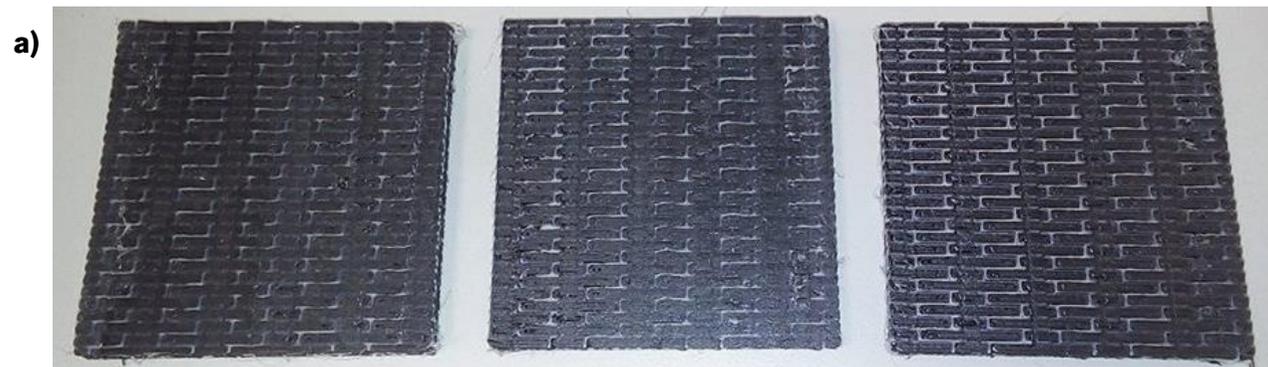


Figura 42. Provede de Impacto impresso. a) G6-Impact/ Flex 45

ANEXO II – COMPORTAMENTO DOS PROVETES DURANTE OS ENSAIOS MECÂNICOS

Ensaio mecânico: Tração

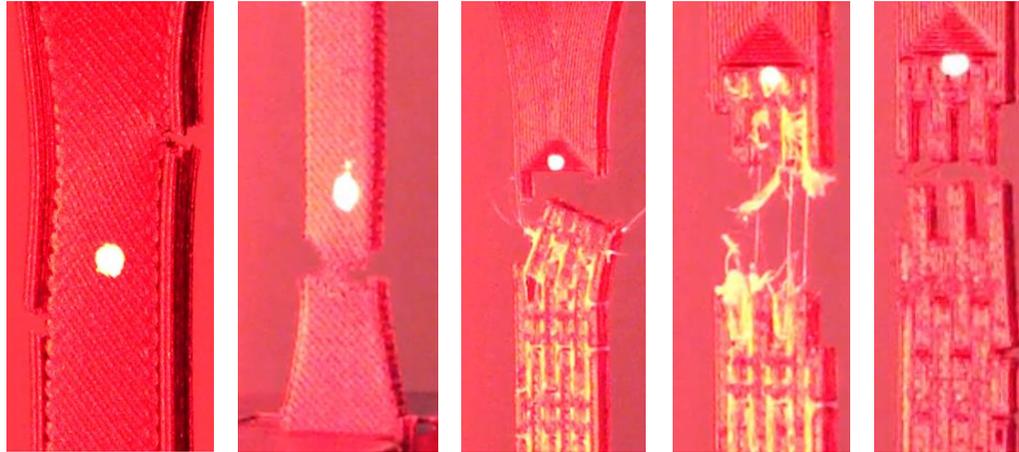


Figura 43. Provetes de tração aquando o ensaio mecânico

Ensaio mecânico: Flexão



Figura 44. Provetes de flexão aquando o ensaio mecânico

ANEXO III – GRÁFICOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio mecânico: Tração

Pares de materiais: G6-Impact; G6-Impact/Flex 45; G6-Impact/ G6-Impact (respetivamente)

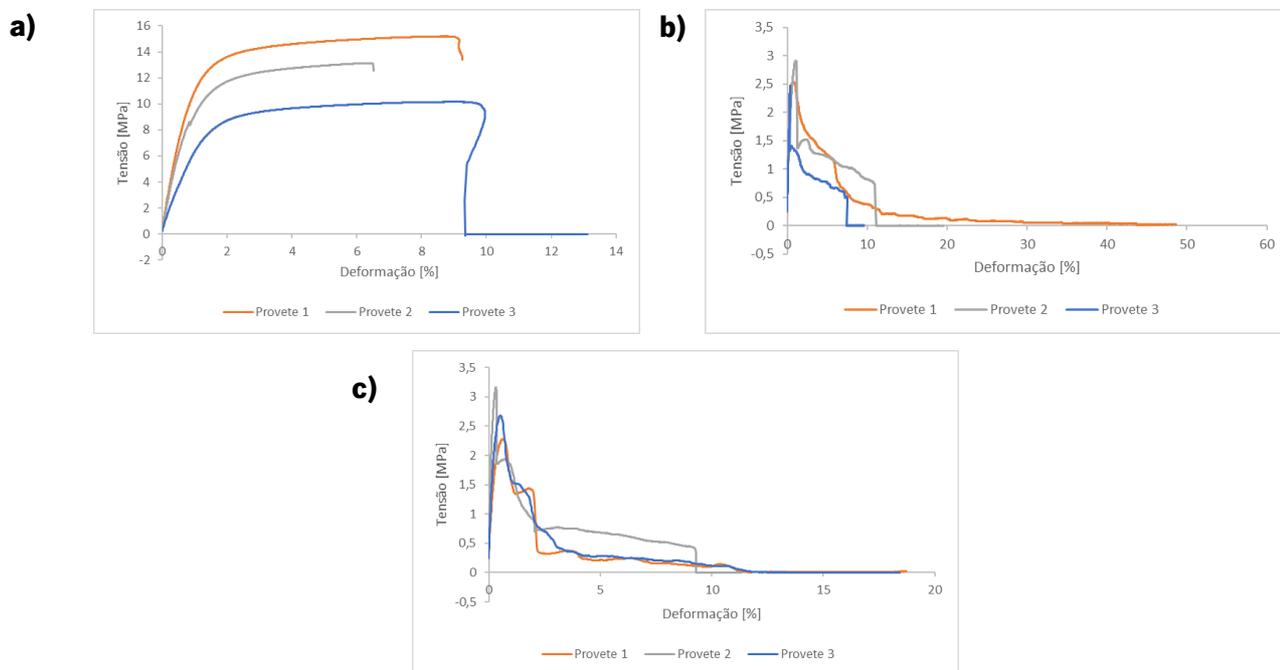


Figura 45. Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/ G6-Impact

Ensaio mecânico: Flexão

Pares de materiais: G6-Impact ; G6-Impact/Flex 45; G6-Impact/ G6-Impact (respetivamente)

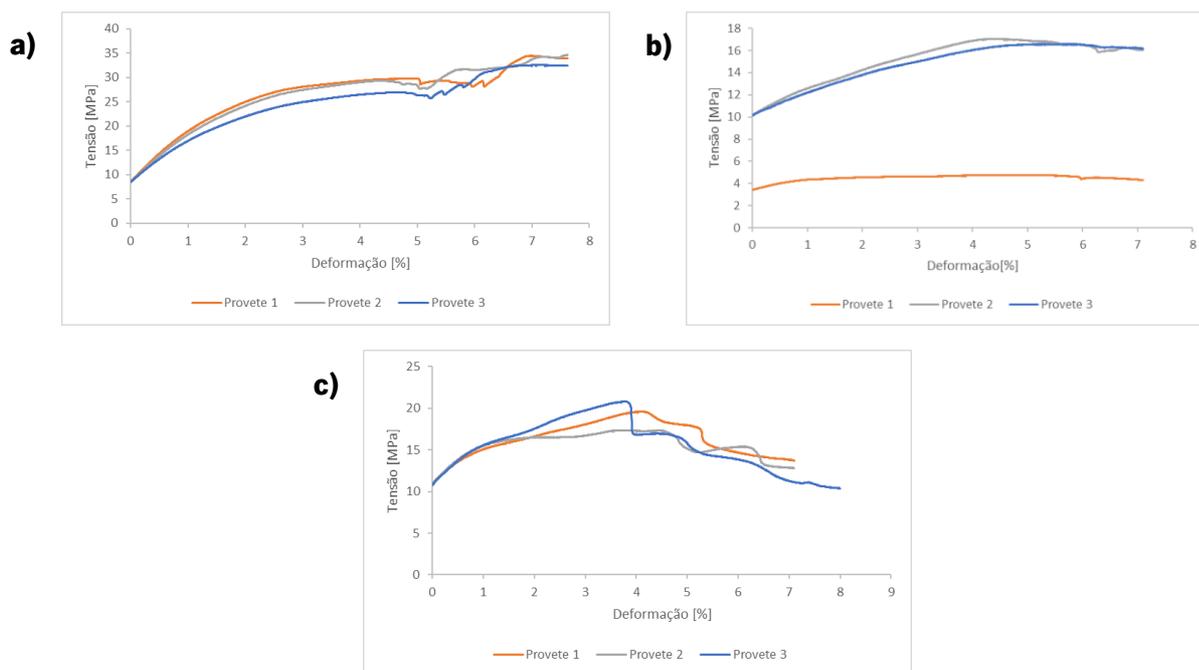
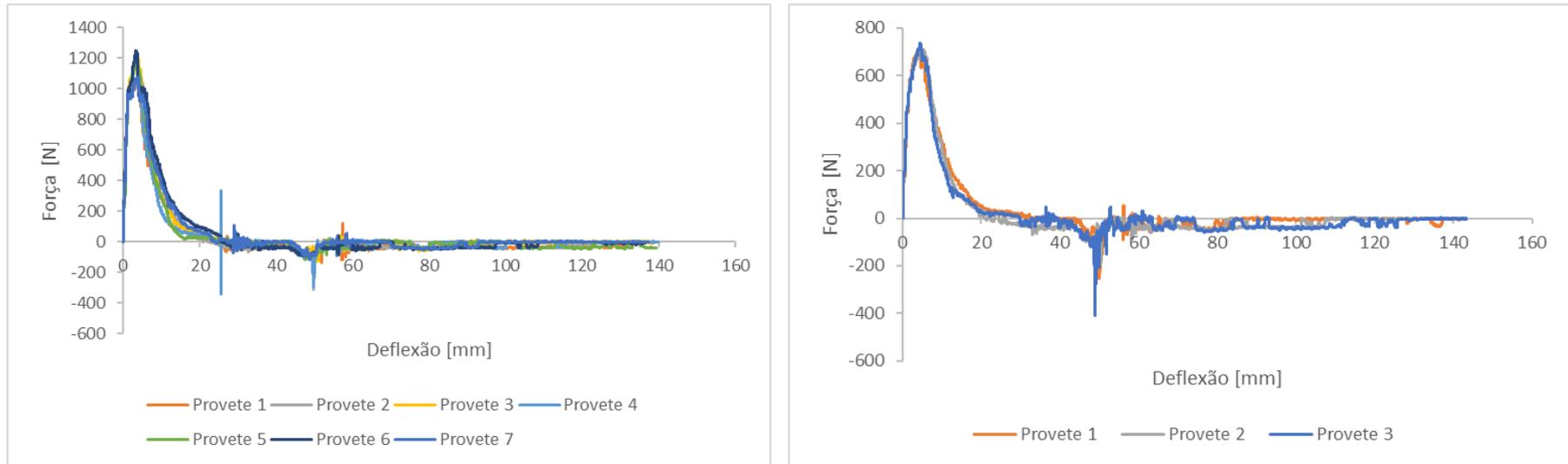


Figura 46. Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45; c) G6-Impact/ G6-Impact

Ensaio mecânico: Impacto**Pares de materiais:** G6-Impact ; G6-Impact/Flex 45 (respetivamente)**Figura 47.** Curva Tensão x Deformação. a) G6-Impact; b) G6-Impact/ Flex 45;