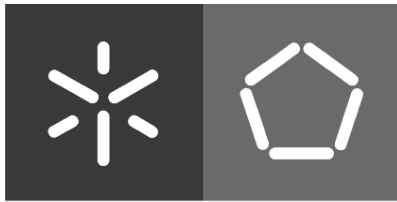


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Renato Barbosa Quintas

Avaliação do impacto da microarquitetura de
impressão 3D de um painel de fachada no seu
desempenho térmico e mecânico



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Renato Barbosa Quintas

**Avaliação do impacto da microarquitetura de
impressão 3D de um painel de fachada no seu
desempenho térmico e mecânico**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
**Professora Doutora Maria Manuela de Oliveira Guedes de
Almeida**

Dezembro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações

CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Agradecimentos

Ao Diogo Torres.

A todos os meus familiares e amigos, que estiveram sempre presentes em todos os momentos ao longo da realização deste objetivo.

À professora doutora Maria Manuela de Oliveira Guedes de Almeida pelo contributo dado fruto da sua experiência e conhecimento.

Ao Daniel Reis e ao Lucas Lopes pela disponibilidade e acolhimento demonstrados desde o primeiro dia e em todas as dificuldades impostas.

À Universidade do Minho e a todo o corpo docente que fizeram parte da caminhada, assim como a todos os colegas que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Avaliação do impacto da microarquitetura de impressão 3D de um painel de fachada no seu desempenho térmico e mecânico

Resumo

A renovação energética dos edifícios é, hoje, uma preocupação a nível europeu, essencial para apoiar a necessária transição energética para atingir a neutralidade carbónica até 2050. Uma forma eficiente de diminuir as emissões de carbono no setor dos edifícios é a redução das suas necessidades energéticas. A melhoria da eficiência energética através do isolamento térmico é uma das soluções mais eficientes, sendo que, por outro lado, a taxa de renovações energéticas do parque imobiliário da Europa tem sido lenta – abaixo de 1% por ano. Para além disso, Portugal tem sido apontado como um dos países mais vulneráveis da União Europeia no que se refere à situação de pobreza energética.

Economicamente, os custos associados a uma reabilitação são muito inferiores aos custos de demolição e posterior reconstrução. A envolvente de um edifício representa uma parte importante dele no que diz respeito a garantir um determinado nível de conforto, sendo por esse motivo necessário que esta seja renovada e se mantenha atualizada ao longo do tempo. De acordo com Oktavia & Kususma (2020), uma correta seleção do material componente da fachada de um edifício é uma das decisões mais importantes que tem de ser tomada, ainda que numa fase precoce da conceção dele, pois é este mesmo material que vai entrar em contacto com o meio ambiente exterior.

Globalmente são produzidas mais de trezentos milhões de toneladas de plástico, e a Europa é o segundo maior produtor desse material. Em Portugal, as baixas taxas de reciclagem – apenas um terço dos resíduos plásticos pós-consumo são reciclados – agravam os problemas ambientais e representam um desperdício de recursos significativo. Portanto, é urgente reduzir estes resíduos, integrando-os nas cadeias de valor para reutilização e reciclagem.

Perante estes dois problemas iminentes, a manufatura aditiva pode ser uma solução adequada a ambos, pois pode contribuir para a reabilitação de edifícios utilizando resíduos plásticos. Ao controlar a geometria interna e as diferentes combinações de preenchimento interno (*infill*), a impressão 3D permite a otimização da condutividade térmica e desempenho mecânico. Com base no método de Modelagem por Deposição Fundida (FDM) este trabalho analisa o desempenho térmico de um conjunto de corpos de prova impressos em 3D com termoplástico PET-G. Diferentes estruturas e preenchimento foram testadas em laboratório para otimização energética e mecânica.

Palavras-Chave: Edifícios; Reabilitação; Poluição plástica; Manufatura aditiva

Assessment of the impact of 3D printing microarchitecture of a façade panel on its thermal and mechanical performance

Abstract

Energy renovation of buildings is now a concern at the European level, essential to support the necessary energy transition to achieve carbon neutrality by 2050. An efficient way to reduce the amount of carbon emissions in the building sector is to reduce its energy needs. Improving energy efficiency through thermal insulation is one of the most efficient solutions, and on the other hand, the rate of energy renovation of Europe's building stock has been slow - below 1% per year. In addition, Portugal has been pointed out as one of the most vulnerable countries in the European Union in terms of energy poverty.

Economically, the costs associated with a renovation are much lower than the costs of demolition and subsequent reconstruction. The envelope of a building represents an important part of it in terms of ensuring a certain level of comfort, and for this reason it is necessary that they are renovated and kept up to date over time. According to Oktavia & Kususma (2020), a correct selection of the material component of the façade of a building is one of the most important decisions that must be made, even at an early stage of its design, because it is this material that will be in contact with the external environment.

Globally, more than three hundred million tons of plastic are produced, and Europe is the second largest producer of this material. In Portugal, low recycling rates - only one third of post-consumer plastic waste is recycled - aggravate environmental problems and represent a significant waste of resources. Therefore, it is urgent to reduce plastic waste by integrating it into value chains for reuse and recycling.

Faced with these two impending problems, additive manufacturing may be a solution that suits both, as it can contribute to the renovation of buildings using plastic waste. By controlling the internal geometry and different fill combinations, 3D printing enables optimization of thermal conductivity and mechanical performance. Based on the Fused Deposition Modeling (FDM) method this work analyzes the thermal performance of a set of 3D printed specimens with PET-G thermoplastic. Different structures and fill were tested in the laboratory for energy and mechanical optimization.

Keywords: Buildings; Rehabilitation; Plastic pollution; Additive manufacturing.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2.	MOTIVAÇÃO	2
1.3.	OBJETIVOS.....	2
1.4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.5.	PACTO ECOLÓGICO EUROPEU	4
1.6.	PROJETO ZEROSKIN+	5
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1.	PREÂMBULO	6
2.2.	IMPACTO DO SETOR DOS EDIFÍCIOS NA VIDA HUMANA E NO MEIO AMBIENTE.....	6
2.2.1.	OS EDIFÍCIOS NA VIDA HUMANA.....	6
2.2.2.	A DIFICULDADE E A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO	8
2.2.3.	O PAPEL DA ENVOLVENTE DE UM EDIFÍCIO.....	8
2.2.4.	OS EDIFÍCIOS VERDES	11
2.3.	IMPACTO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS NO MEIO AMBIENTE	13
2.3.1.	O PLÁSTICO: O QUE É, QUAIS AS SUAS VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES?.....	13
2.3.2.	OS IMPACTOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA	14
2.3.3.	O MATERIAL: PET-G.....	15
2.4.	MANUFATURA ADITIVA.....	17
2.4.1.	O QUE É, QUAIS AS SUAS APLICAÇÕES, VANTAGENS E DESVANTAGENS?	17
2.4.2.	OS DIFERENTES PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	18
2.4.3.	FATORES INFLUENCIADORES DA QUALIDADE DE IMPRESSÃO	20
2.4.4.	INFILL	21
2.4.5.	A MANUFATURA ADITIVA E A MODELAÇÃO POR INJEÇÃO	24
3.	METODOLOGIA DE TRABALHO	26

3.1. ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO	26
3.2. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.2.1. A IMPRESSORA	27
3.2.2. GEOMETRIAS INTERNAS.....	28
3.2.3. ENSAIOS	30
3.2.3.1. ENSAIOS TÉRMICOS.....	30
3.2.3.2. ENSAIOS MECÂNICOS	36
3.2.3.2.1. ENSAIOS À TRAÇÃO.....	36
3.2.3.2.2. ENSAIOS À FLEXÃO	42
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	50
4.1. ENSAIOS TÉRMICOS	50
4.2. ENSAIOS MECÂNICOS.....	52
4.2.1. ENSAIOS À TRAÇÃO	52
4.2.2. ENSAIOS À FLEXÃO	56
4.3. SÍNTESE.....	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1. CONCLUSÕES.....	63
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

ABREVIATURAS

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EBM – Eletron Beam Melting

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

FDM – Fused Deposition Modeling

FFF – Fused Filament Fabrication

LENS – Laser Engineered Net Shaping

LFCT – Laboratório de Física e Tecnologia das Construções

LOM – Laminated Object Manufacturing

PET-G – Polietileno Tereftalato Glicol

SLA – Stereolitography

SLS – Selective Laser Sintering

XPS – Poliestireno Extrudido

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bobine de PET-G.....	16
Figura 2. Resistência média das amostras de PLA segundo a percentagem de <i>infill</i>	23
Figura 3. Resistência médias das amostras de PLA segundo a percentagem de <i>infill</i>	23
Figura 4. Impressora 3D.....	28
Figura 5. Geometrias disponibilizadas pelo <i>software</i>	29
Figura 6. Exemplos das várias geometrias utilizadas na dissertação.....	29
Figura 8. Modelação dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.....	30
Figura 9. Vista interior dos painéis.....	31
Figura 10. Impressão de um dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.....	32
Figura 11. Pormenor do interior da impressão de um dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.....	32
Figura 12. Exemplo totalmente impresso.....	33
Figura 13. <i>Hot Box</i> . a) Esquema da <i>Hot Box</i> fechada. b) Esquema da <i>Hot Box</i> aberta. c) Fotografia da <i>Hot Box</i> . d) Fotografia da câmara fria da <i>Hot Box</i>	34
Figura 14. Painel submetido a um ensaio térmico.....	35
Figura 15. Esquema representativo e dimensões das amostras a serem testadas.....	36
Figura 16. Modelação das peças que serão alvo de testes de tração.....	37
Figura 17. Resultado da impressão das peças anteriormente moldadas em <i>software</i>	38
Figura 18. Amostra de uma peça que será alvo de teste de tração.....	38
Figura 19. Exemplo de teste à tração.....	39
Figura 20. Disposição da peça prestes a ser ensaiada.....	40
Figura 21. Resultado de um ensaio à tração.....	41
Figura 22. Esquema representativo e dimensões das amostras a serem testadas à flexão.....	42
Figura 23. Modelação das peças alvo de teste à flexão.....	43
Figura 24. Pormenor da geometria interna das peças alvo de teste à flexão.....	43
Figura 25. Resultado da impressão das peças a serem testadas à flexão.....	44
Figura 26. Amostra de peça prestes a ser ensaiada à flexão.....	45
Figura 27. Equipamento para a realização dos ensaios de flexão.....	46
Figura 28. Esquema representativo dos ensaios a realizar.....	46
Figura 29. Ensaio de flexão.....	47
Figura 30. Pormenor da orientação de impressão, na geometria Stars com 50% de <i>infill</i>	48
Figura 31. Amostras pós-teste.....	48

Figura 32. Pormenor das geometrias internas.....	49
Figura 33. Representação gráfica do coeficiente de transmissão térmica das amostras analisadas.	51
Figura 34. Representação gráfica da resistência à tração das amostras estudadas (kN).....	53
Figura 35. Representação gráfica da resistência à tração das amostras estudadas (kN).....	55
Figura 36. Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios à tração realizados (kN).....	56
Figura 37. Gráfico síntese dos resultados dos testes à flexão.....	58
Figura 38. Exemplares com 75% de <i>infill</i> após teste à flexão.....	59
Figura 39. Diagrama triangular obtido no Mixtri2.0.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Condições ideais de impressão utilizando o PET-G, de acordo com os estudos referidos.	17
Tabela 2. Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva.	18
Tabela 3. Vantagens e desvantagens das técnicas de manufatura aditiva.	19
Tabela 4. Resultados dos ensaios térmicos.	51
Tabela 5. Resultados da primeira fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).....	52
Tabela 6. Resultados da segunda fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).	54
Tabela 7. Resultados da terceira fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).....	54
Tabela 8. Resultado dos ensaios mecânicos de tração com amostra com 100% de <i>infill</i> (kN).	55
Tabela 9. Resultados da primeira fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).	56
Tabela 10. Resultado da segunda fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).....	57
Tabela 11. Resultado da terceira fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).	57
Tabela 12. Síntese dos melhores resultados obtidos em cada tipo de ensaio realizado.	60
Tabela 13. Custos associados a cada geometria para um painel com 500x150x500 mm (comprimento x espessura x altura) e com 25% de <i>infill</i>	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

De acordo com Gieryn (2014), os edifícios garantem parte da estabilidade necessária à vida das pessoas, pois, estas passam cerca de 80% até 90% das suas vidas no interior deles (Sarbu & Sebarchievici, 2013). Na Europa, os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do total da energia utilizada e por 36% do total das emissões de CO_2 , sendo por isso importante melhorar, o quanto antes, o desempenho energético associado aos mesmos de forma a reduzir o seu impacto ambiental (H. X. Zhao & Magoulès, 2012). No caso de edifícios existentes, a pegada de carbono na operação do edifício representa 75%, enquanto o carbono incorporado representa os restantes 25% (Röck et al., 2020).

Cada pessoa consome, em média, cerca de 50 kg/ano de plástico na União Europeia e cerca de 68 kg/ano nos Estados Unidos da América (Thiounn et al., 2020). É estimado que o plástico perfaça cerca de 10% dos resíduos familiares, e cerca de 60-80% dos resíduos encontrados nas praias e/ou nos oceanos (Verma et al., 2016). Atualmente, segundo Qureshi et al. (2020), a baixa percentagem de reciclagem de plástico aliada ao crescimento exponencial da sua produção leva ao aumento do desperdício, resultando assim em resíduos. Uma alternativa à deposição dos resíduos plásticos é o recurso ao processo de reciclagem (Shent et al., 1999).

Relativamente a estes problemas oriundos da poluição plástica, a manufatura aditiva pode desempenhar um papel de destaque ao nível da economia circular, através da oportunidade que esta representa para a reutilização de resíduos de materiais termoplásticos (Cruz Sanchez et al., 2020).

O processo da manufatura aditiva, comumente conhecido por impressão 3D, surge como uma técnica de manufatura altamente versátil e promissora (K. Wang et al., 2020). O mesmo estudo diz que a manufatura aditiva é um método que permite a produção de objetos com a geometria interna desejada pelo utilizador. Segundo X. Wang et al. (2017), a impressão 3D permite a criação de estruturas internas complexas (permitindo que os produtos gerados apresentem um desempenho muito bom), sem os gastos materiais por norma associados a outras técnicas de manufatura.

Sendo a manufatura aditiva utilizada com sucesso em inúmeros setores profissionais, esta tem demonstrado um enorme potencial económico (Fu et al., 2021). Já Elmrabet & Siegkas (2020), refere que esta técnica pode ser uma opção muito rentável que se caracteriza pela sua capacidade de reduzir os gastos materiais, o que se traduz na redução dos desperdícios inerentes.

1.2. MOTIVAÇÃO

A eficiência energética e a sustentabilidade dos edifícios são uma das maiores preocupações da atualidade, uma vez que estes têm como principal objetivo a garantia das condições de conforto dos seus utilizadores, que passam entre 80% a 90% do seu tempo em espaços fechados (edifícios), o que demonstra a importância que estes representam para a vida do ser humano. Fruto desta utilização, é obrigatório controlar os consumos energéticos neste setor de forma a manter ou até mesmo, idealmente, melhorar as condições de conforto interior que são garantidas aos utilizadores (Monteiro Da Silva & Guedes De Almeida, 2010).

Surge assim o Pacto Ecológico Europeu que tem como objetivo atingir a neutralidade carbónica na Europa em 2050. Este objetivo revela-se um grande desafio pois cerca de 70% dos edifícios existentes em 2050 já se encontram construídos ao dia de hoje, o que significa que grande parte das reduções energéticas têm de surgir através de profundas reabilitações (Visscher et al., 2016). Contudo, a reabilitação encontra algumas barreiras à sua execução, principalmente por parte dos proprietários dos edifícios (Rodrigues & Almeida, 2012).

Segundo Hamburg et al. (2020), cerca de 90% dos edifícios existentes devem ser renovados de forma a cumprir os objetivos definidos de atingir a neutralidade carbónica em 2050. A atual taxa de renovação acontece na ordem dos 1% sendo que para se conseguirem atingir as metas definidas esta taxa devia aumentar até situar-se nos 3%.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação consiste na avaliação da influência que a microestrutura de um painel de fachada exterior tem no seu desempenho mecânico e térmico. Como parte da microestrutura do painel impresso, há a considerar a sua geometria e a percentagem de *infill* que vão ser alvo de análise, sob a forma de testes térmicos e mecânicos, para que se consiga identificar aqueles que apresentam os melhores desempenhos.

Após consulta à bibliografia recomendada, e com recurso à impressão 3D segundo o método FDM (Fusion Deposition Modelling), foi desenvolvido um conjunto de amostras com diferentes geometrias e percentagens de *infill*, de forma a avaliar os seus desempenhos.

Uma vez efetuada a análise dos resultados obtidos, é possível avaliar a variação do desempenho de cada painel de acordo com parâmetros relativos ao edifício e perceber qual o mais adequado a cada caso.

Todo este processo de impressão dos vários painéis, com diferentes características ao nível da microestrutura, será efetuado com o objetivo de garantir uma economia circular, ou seja, na produção do painel será utilizado um plástico reciclado, tendo este painel por base aquela que será a melhor microestrutura definida de acordo com o desenvolvimento deste trabalho.

Desta forma será possível compreender um pouco mais acerca da influência que a manufatura aditiva pode apresentar no setor da construção, mais concretamente nesta etapa desafiante relativa ao Pacto Ecológico Europeu, percebendo se as suas vantagens podem vir a ser aliadas do mesmo.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada por capítulos, contendo cinco capítulos interligados.

O primeiro capítulo introduz a temática, onde são apresentados a motivação e os objetivos gerais assim como os projetos nos quais esta dissertação está inserida.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, onde são abordados os impactos causados pelo setor dos edifícios e pelos plásticos tanto na vida humana como no meio ambiente, percebendo as vantagens e as desvantagens associadas. Este capítulo apresenta também a manufatura aditiva de uma forma detalhada para uma melhor compreensão da temática principal desta dissertação.

Já no terceiro capítulo é descrita a metodologia de trabalho adotada, passando pelas etapas de investigação e pelos equipamentos e materiais utilizados para realizar os ensaios definidos como necessários.

No quarto capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados descritos no capítulo anterior.

Por fim, no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao longo deste estudo, assim como as considerações futuras importantes na realização de posteriores trabalhos relativos a este tema.

1.5. PACTO ECOLÓGICO EUROPEU

O Pacto Ecológico Europeu foi oficializado no final do ano de 2019 e representa a maior ação da União Europeia para atingir a neutralidade carbónica (Kougias et al., 2021). De acordo com Montanarella & Panagos (2021), a Europa enfrenta assim o desafio de ser o primeiro continente mundial a atingir essa meta. Pode assim ser definido o Pacto Ecológico Europeu como uma rota de políticas que se acredita que levarão a Europa a atingir o objetivo principal proposto por ele (Siddi, 2020). Este Pacto tenciona aplicar estratégias ambientais com o objetivo de atingir um modelo de economia circular (Eckert & Kovalevska, 2021).

Como disse o secretário-geral das Nações Unidas, António Guterres “a emergência climática é uma corrida que estamos a perder, mas é uma corrida que podemos ganhar”, sendo que segundo Amorim & Cardoso (2021), o crescimento do negacionismo relativo a este tema apenas é prejudicial, uma vez que se registam evidências científicas acerca da real ameaça climática que se está a viver.

A atual catástrofe ambiental foi colocada temporariamente de parte, fruto da excecional situação pandémica, o que numa primeira impressão pode parecer benéfica para o ambiente dado que se reduziram as emissões de carbono em cerca de 30% em comparação com o ano anterior (Pihl et al., 2020), fruto da menor atividade económica e conseqüente diminuição do setor dos transportes, mas que dentro de pouco tempo voltará a ser notícia captando a atenção do mundo para este enorme problema que está momentaneamente “adormecido” (Eckert & Kovalevska, 2021).

As melhorias ao nível da eficiência energética dos edifícios podem levar à redução das emissões de carbono (a União Europeia pode reduzir em quatrocentos e sessenta mil milhões de toneladas por ano, um valor superior ao definido pelo acordo de Kyoto), já no que diz respeito ao setor da construção, as melhorias nas poupanças energéticas dos edifícios podem garantir quinhentos e trinta mil postos de trabalho durante o período de renovação estimado de 30 anos (Vo et al., 2011).

De acordo com Siddi (2020), está definido atingir uma redução de 55% das emissões de carbono até ao ano de 2030 quando em comparação com as emissões registadas no ano de 1990. Já segundo Saraiva et al (2019), o Pacto Ecológico Europeu tem como objetivo a obtenção da neutralidade carbónica na Europa em 2050, revelando-se este um grande desafio pois grande parte dos edifícios existentes nessa data já se encontram construídos atualmente. Surge assim a extrema necessidade da reabilitação energética dos edifícios, que apresenta reconhecidas vantagens a vários níveis como a melhoria da qualidade do ambiente interior, a proteção dos utilizadores de eventos climáticos extremos e a criação de postos de trabalho.

Este pacto pode e deve ser visto não apenas como um desafio ambiental, mas também como um desafio que engloba as vertentes sociais e económicas sob a forma de uma oportunidade (Wolf et al., 2021). Segundo a presidente da Comissão Europeia, Ursula von der Leyen o Pacto Ecológico Europeu é a nova estratégia de crescimento que ajudará, simultaneamente a reduzir emissões e criar postos de trabalho.

1.6. PROJETO ZEROSKIN+

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto ZeroSkin+ que consiste no desenvolvimento de um painel modular para reabilitação de edifícios residenciais, tendo estes painéis por base materiais naturais e/ou plásticos reciclados.

Este é um processo que tem como objetivo contribuir para a urgente e desafiante necessidade de reabilitar os edifícios existentes que já se encontram deteriorados, fruto do desgaste ao longo dos anos, e apresentam uma baixa eficiência energética, quando em comparação com os padrões atuais.

Estes motivos conduziram à investigação realizada neste projeto, que surge assim com uma abordagem baseada num sistema modular pré-fabricado para renovação estrutural e energética dos edifícios necessitados, utilizando a manufatura aditiva com recurso a materiais baseados em plásticos reciclados.

Este é um projeto que já se encontrava em curso aquando do início da realização desta dissertação, e que continuará após o término dela, servindo e tendo como objetivo que este documento possa auxiliar posteriores pesquisas e investigações a realizar no âmbito deste projeto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. PREÂMBULO

Neste capítulo, serão apresentadas todas as informações básicas necessárias para a compreensão do tema, assim como o respetivo método de pesquisa realizado. Toda esta revisão bibliográfica, efetuada com o objetivo de aprofundar e aprimorar o tema em estudo, teve em conta apenas conteúdo certificado cientificamente como dissertações, livros e artigos até à corrente data publicados, e que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento de conhecimento, assim como para a realização da dissertação.

2.2. IMPACTO DO SETOR DOS EDIFÍCIOS NA VIDA HUMANA E NO MEIO AMBIENTE

2.2.1. OS EDIFÍCIOS NA VIDA HUMANA

A população existente no ano 2000 situava-se nos seis mil milhões (Cohen, 2002), mas, de acordo com Specht et al. (2014), é projetada a existência de nove mil milhões de pessoas a coexistirem no mundo pelo ano de 2050 e, atualmente, pela primeira vez na história da existência humana, mais de metade da população que habita o planeta Terra vive em ambiente citadino, estimando-se que haja um aumento destes números em até 60% pelo ano de 2030.

Devido ao desenvolvimento económico e ao crescimento populacional as cidades vão sendo dominadas por edifícios, contudo nem sempre albergam as necessidades dos utilizadores. Assim, passou a existir a necessidade de melhorias nos edifícios para satisfazer os utilizadores, o que resultou num aumento do consumo energético dos edifícios, colocando este setor ao nível do setor dos transportes e da indústria, no que se refere à poluição causada (Mirrahimi et al., 2016).

A construção de edifícios, tanto para fins residenciais como profissionais é alvo de objetivos que devem ser cumpridos, conforme a sua finalidade. Para além de todos os objetivos básicos já conhecidos ao nível de conforto, durabilidade e preço, surge cada vez mais o conceito ambiental aquando da conceção do edifício (Agarwal & Gupta, 2017). No caso de edifícios com finalidade profissional, as suas preocupações vão ainda mais além, pois segundo Clements-Croome et al. (2000), os fatores que mais afetam a produtividade dos trabalhadores são a satisfação com o trabalho que estão a realizar e as condições físicas do edifício onde estão inseridos, onde se as condições forem favoráveis a produtividade pode aumentar consideravelmente de 4% até 10%.

Segundo Singh (2018), o enorme impacto do setor dos edifícios no ambiente deve-se também ao consumo que eles apresentam de eletricidade e de água potável, na ordem dos 70%, e dos 12%, respetivamente, sendo que são ainda os responsáveis pela produção de 45% a 65% dos resíduos que são depositados em aterros.

De acordo com Vo et al. (2011), os edifícios construídos entre 1940-1975 são os que apresentam, na sua generalidade, o maior consumo energético, motivo pelo qual as aplicações de medidas de melhorias na eficiência energética destes edifícios podem se revelar importantes, ao trazerem inúmeras vantagens, como a redução de emissões de carbono, poupanças económicas significativas e a criação/preservação de centenas de milhares de postos de trabalho.

A energia consumida pelos edifícios depende significativamente do critério utilizado para definir o conforto do ambiente interior. Os parâmetros que definem este nível de conforto são: o conforto térmico, acústico, visual e a qualidade do ar interior (Sarbu & Sebarchievici, 2013). A existência de um ambiente confortável é essencial para a vida das pessoas, traduzindo-se em maiores níveis de saúde e de produtividade (Mallick, 1996).

De forma a ser garantido o conforto térmico no interior de um espaço, devem ser asseguradas a temperatura, humidade e velocidade do ar, assim como o calor radiante, com o objetivo de manter a temperatura interna do corpo do utilizador entre os $37\pm 0,8^{\circ}\text{C}$, evitando desconfortos, causados pela falta de equilíbrio térmico, como arrepios e tremuras (Lopes, 2007).

Segundo Taleghani et al. (2013), o conforto térmico é definido como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico no qual o indivíduo se insere. Segundo ASHRAE (2005), as temperaturas de conforto variam de acordo com a humidade relativa: para uma humidade relativa de 65% a temperatura do espaço interior deve variar entre $22,5^{\circ}\text{C}$ e $25,5^{\circ}\text{C}$, já para uma humidade relativa de 35% a temperatura do espaço interior deve variar entre 23°C e 26°C . O já referido estudo realizado por Taleghani et al. (2013), aponta, ainda, três razões para ajudar a compreender a importância que o conforto térmico tem para os utilizadores dos edifícios: garantir uma condição aceitável relativa ao ambiente interior que é utilizado; permitir o controlo dos gastos energéticos associados; definição de padrões.

2.2.2. A DIFICULDADE E A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO

Segundo Silva (2006), pode-se, de uma forma simples, definir a reabilitação de edifícios como a melhoria da qualidade do edifício comparativamente com a apresentada antes deste ser sujeito à intervenção, sendo por isso, a reabilitação uma operação importante para a manutenção ou idealmente a melhoria do desempenho energético dos edifícios já existentes.

De seguida são apresentados dois fatores cruciais que demonstram a importância da execução da reabilitação: cerca de 70% dos edifícios portugueses foram construídos antes de 1990 – data da entrada em vigor do primeiro regulamento térmico (Rodrigues & Almeida, 2012); a idade dos edifícios é o outro fator determinante no desempenho global deles, pois quanto mais velhos mais deteriorados estarão (no caso de não se terem registado intervenções com o intuito de reabilitar) pelo que menores serão os seus desempenhos energéticos. Devido à exigência que os utilizadores, dos edifícios que não garantem o devido desempenho energético, apresentam em pretender níveis de conforto que garantam conformidade com os níveis apresentados por edifícios recentes, leva à necessidade de recorrer ao consumo energético traduzindo-se num maior gasto energético (Silva, 2006).

A reabilitação térmica encontra algumas barreiras à sua execução, essencialmente por parte dos proprietários, sendo o principal motivo a falta de conhecimento dos mesmos relativamente às vantagens da reabilitação, que quando aliada ao investimento financeiro inicial necessário e ao longo período de retorno, leva a uma perceção errada, por parte dos utilizadores dos edifícios acerca das vantagens da reabilitação, tornando este processo muito mais complicado de se realizar (Rodrigues & Almeida, 2012).

O inquérito efetuado por Nair et al. (2010), a proprietários de edifícios, relativamente à adoção de medidas direcionadas para obter uma melhor eficiência energética dos edifícios já existentes, mostrou a relutância da maioria dos proprietários inquiridos, uma vez que eles se encontram satisfeitos com o desempenho dos edifícios. Estes proprietários atribuíram uma grande importância ao fator económico, e devido ao entrave gerado pelo elevado investimento inicial necessário, foi assim sugerida a implementação de subsídios estatais que incentivem a aplicação destas medidas intensivas de renovação energética dos edifícios.

2.2.3. O PAPEL DA ENVOLVENTE DE UM EDIFÍCIO

A envolvente de um edifício é o elemento que separa o ambiente exterior do ambiente interior, sendo por isso um componente extremamente importante para determinar e controlar a qualidade do ambiente

interior. A eficiência energética de um edifício pode ser melhorada através da aplicação de várias estratégias, sendo que as melhorias ao nível da envolvente são consideradas como uma estratégia passiva que nos últimos anos tem sido cada vez mais vista como uma opção viável (Sadineni et al., 2011).

A envolvente é construída com o objetivo de proteger os edifícios de condições ambientais indesejadas de forma a garantir o conforto térmico do edifício. É de extrema importância a conceção de diferentes designs relativos à envolvente para conseguir adaptar a mesma às condições a que estará sujeita, sendo que uma má interpretação nesta fase levará a maiores consumos de energia evitáveis, por isso, este parâmetro é considerado o mais importante uma vez que está diretamente ligado à eficiência energética do edifício (Mirrahimi et al., 2016).

O estudo desenvolvido por Oktavia & Kususma (2020), apresenta algumas das características essenciais que são requeridas para um material constituir a fachada de um edifício, entre elas:

- durabilidade – capacidade de o material cumprir com as suas funções ao longo do seu ciclo de vida sem a necessidade de grandes reparações;
- sustentabilidade – a capacidade de obter o material através de fontes renováveis que não afetem o meio ambiente;
- saudável e seguro – incapacidade do material em causar danos de natureza física ou psicológica aos utilizadores;
- funcional – capacidade de o material oferecer o seu melhor de acordo com as suas características de uma forma eficiente e sem necessitar de custos de manutenção associados;
- desempenho térmico – define a capacidade de resposta às mudanças climáticas tanto diárias como sazonais;
- desempenho acústico – capacidade de absorver os sons exteriores evitando ruídos interiores indesejados pelos utilizadores;
- higiénico – permite uma limpeza simples e eficaz;
- compatibilidade – facilidade de integração e combinação com outros materiais constituintes do edifício.

De forma a cumprir todos os requisitos acima enumerados, surgem os sistemas responsáveis pelo isolamento de um edifício que compreendem um extenso grupo de soluções desde a criação de condições favoráveis para que a estrutura do edifício funcione em pleno mantendo a sua eficiência e integridade, durante extensos períodos de tempo, reduzindo a necessidade de manutenção, passando pela criação de condições adequadas de temperatura e humidade garantindo o conforto dos utilizadores, muito devido à efetividade do material utilizado que deve otimizar as perdas térmicas e eliminar as infiltrações de ar e vapor de água indesejadas (Pilipenko et al., 2019).

Segundo Ribeiro (2013), o isolamento térmico permite reduzir os custos de aquecimento/arrefecimento e as emissões de poluentes, o que demonstra a importância de um correto isolamento, de forma a evitar perdas de calor e consequentemente necessitar de menores gastos energéticos para repor o conforto térmico.

A aplicação de um sistema de isolamento térmico pelo exterior de um edifício leva à redução das pontes térmicas e equilibra o coeficiente de transmissão térmica através da fachada permitindo poupanças de energia, redução das condensações superficiais, melhoria do ambiente interior tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento, para além de que permite que a espessura das paredes seja menor, o que leva à redução do peso das mesmas que resulta numa menor carga aplicada sobre a parte estrutural do edifício (Silvestre et al., 2019).

Os sistemas de isolamento térmico pelo exterior, denominados por ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*), começaram a ser utilizados frequentemente na Europa a partir de 1970, tanto nas novas construções como em reabilitações. Este sistema ganhou particular destaque devido às vantagens que ele apresenta, como potenciar a redução das pontes térmicas e o aumento da inércia térmica, o que garante melhorias de conforto térmico no interior do edifício. Do ponto de vista da construção, estes sistemas apresentam três importantes vantagens: baixo custo, facilidade de aplicação e a possibilidade de serem instalados sem incomodar os moradores (aspecto particularmente interessante quando se trata de renovações). É apontada como principal desvantagem a deterioração das fachadas devido a fatores biológicos a que elas estão inequivocamente sujeitas, embora isto seja um problema no qual o maior impacto com que se depara seja a nível estético (Barreira & de Freitas, 2014).

Este tipo de isolamento, com recurso ao EPS (Poliestireno Expandido) na sua constituição é, de acordo com Silvestre et al. (2019), a solução mais utilizada em Portugal devido essencialmente ao seu baixo custo e baixa condutividade térmica.

De acordo Vo et al. (2011), desde a descoberta do XPS (Poliestireno Extrudido) nos princípios da década de 1940 que têm sido produzidos e utilizados como material responsável pelo isolamento na indústria da construção, sendo atualmente cada vez mais utilizados e apresentando expectativas futuras de crescimento devido ao seu desempenho e durabilidade.

Segundo X. Zhao (2017), os parâmetros térmicos do EPS e do XPS são muito idênticos. Já Hilal Amir & Halil Zafer Alibaba (2017), mostra que o custo do EPS é inferior ao do XPS, dominando por isso o mercado europeu em relação a outros materiais com função de isolamento. Outra vantagem do EPS é o facto deste poder ser reciclado sem perda de qualidade do material.

2.2.4. OS EDIFÍCIOS VERDES

Existem inúmeras definições sobre o que são edifícios verdes, mas segundo Geng et al. (2019), estes são geralmente definidos como o planeamento, desenho e construção com o máximo de conservação de recursos, protegendo o ambiente através da redução da poluição e garantindo todo o conforto interior necessário para que os utilizadores possam desempenhar as suas tarefas.

Segundo Olubunmi et al. (2016), a indústria da construção é um dos setores responsáveis pelos danos causados no ambiente, devido especialmente ao seu grande consumo energético. Os edifícios verdes são, na prática, a criação de estruturas e de formas de utilização que garantem poupanças ao nível dos recursos ao longo de todo o ciclo de vida esperado para o edifício. Este tipo de edifícios apresenta vantagens de vários tipos:

- ambientais (minimizando o impacto ambiental adverso devido ao conjunto de técnicas aplicadas);
- sociais (estes edifícios têm a capacidade de melhorar, para o utilizador, o ambiente ao qual se destinam);
- económicas (permitem poupanças ao longo do seu ciclo de vida, e ainda se tornam mais fáceis de vender devido às suas características).

Segundo o mesmo estudo, e apesar das vantagens apresentadas, são necessários incentivos para influenciar a opção dos investidores por este tipo de edifícios.

Segundo Kibert (2004), os edifícios verdes são facilmente projetados, construídos e renovados e partem do princípio de que devem garantir o bem-estar dos ocupantes, assim como uma eficiência nos recursos utilizados que se traduz na redução dos impactos ambientais causados por este setor. Este tipo de construção pode ser considerado como o caminho a seguir, pois é a resposta ambiental que este setor pode oferecer, pois todo o seu ciclo de vida, assim como os materiais utilizados, é cuidadosamente pensado antes da conceção do edifício, sendo que os edifícios tradicionais apresentam apenas a mínima preocupação com os gastos de energia e de água e ignoram totalmente os gastos de materiais.

Apesar de todas as vantagens teoricamente apontadas aos edifícios verdes, é sabido muito pouco acerca da satisfação prática dos utilizadores destes. Segundo Gou et al. (2013), quando comparados com os edifícios tradicionais, alguns utilizadores consideram os edifícios verdes superiores a nível de utilização e de conforto, contudo, é importante ter em conta que os utilizadores destes edifícios são mais tolerantes com eles, motivo pelo qual algumas insatisfações relativas ao conforto de utilização do espaço podem ter inconscientemente acabado por ser toleradas.

O estudo levado a cabo por Abbaszadeh et al. (2006), teve como objetivo perceber a satisfação dos utilizadores dos novos edifícios verdes quando comparados com os edifícios tradicionais já existentes, relativamente à qualidade do ambiente interior no seu espaço de trabalho. O objetivo passou por perceber a perspectiva dos utilizadores que lidam diariamente com estes edifícios, de forma a compreender se eles conseguem corresponder às necessidades exigidas, ou caso contrário onde há margem de evolução. Foi possível concluir que os utilizadores de edifícios verdes estão por norma satisfeitos com a qualidade do ar e o conforto térmico garantido pelos mesmos, embora não se tenham verificado diferenças evolutivas relativamente aos parâmetros de conforto acústico e de iluminação (sendo necessário continuar a recorrer a fontes energéticas para garantir este tipo de conforto) quando comparado com edifícios tradicionais.

2.3. IMPACTO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS NO MEIO AMBIENTE

2.3.1. O PLÁSTICO: O QUE É, QUAIS AS SUAS VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES?

De acordo com Proshad et al. (2018), o plástico mudou completamente o quotidiano dos cidadãos pois estes convivem grande parte do seu tempo com objetos feitos ou derivados de plástico. Por isso, o plástico constitui uma parte importante na vida humana, tornando-a mais acessível, motivo pelo qual as pessoas encontram-se cada vez mais dependentes dele.

Os anos de deposição de plástico no meio ambiente resultou em diversos problemas associados (Alabi et al., 2019). A poluição devido a resíduos plásticos, de acordo com Li et al. (2016), tem ganho ao longo dos últimos anos uma atenção especial tanto por parte dos investigadores como do público em geral.

O plástico é um componente orgânico constituído por moléculas gigantes produzidas essencialmente por derivados de óleos sintéticos que pode ser moldado em diversas formas de objetos sólidos (Verma et al., 2016).

O uso do plástico e os resíduos consequentes dessa utilização têm-se revelado cada vez maiores, levando a efeitos negativos tanto para o meio ambiente como para a saúde humana. As soluções para este problema passam essencialmente pela redução de resíduos de forma a ser possível diminuir as emissões (Nagy & Kuti, 2016).

Segundo Verma et al. (2016), as propriedades do plástico fazem dele um material valioso ao mesmo tempo que o tornam um problema ambiental global. Pode-se assim aferir que as suas vantagens acabam por ser as suas próprias desvantagens.

A quantidade de plástico que culmina em resíduo continua a aumentar cada vez mais, estimando-se um crescimento anual na ordem dos 4%, isto deve-se ao facto dos plásticos serem um material extremamente útil e versátil para os consumidores nos mais variados setores (Goodship, 2007), como garrafas plásticas, embalagens de comida e medicamentos, bem como materiais necessários à construção (Alabi et al., 2019).

O plástico apresenta inúmeras vantagens para os utilizadores como o seu baixo custo, a sua durabilidade, a sua resistência e as boas propriedades como material de isolamento, trazendo assim, a sua utilização

muitos benefícios (Nasir & Ahsan, 2020). Já Proshad et al. (2018), acrescenta a estas vantagens, outras como o facto de ser um material suave, transparente e flexível. Como indica Agarwal & Gupta (2017), a capacidade que os materiais de base polimérica apresentam e tornando-se por isso substitutos eficazes de materiais tradicionais inerentes ao setor da construção, acrescentando assim algumas vantagens dos plásticos associadas a esse setor como a sua durabilidade, baixo custo de manutenção, facilidade de obter formas complexas com variadas cores e texturas, sendo também um bom isolador de corrente elétrica.

Contudo, o plástico apresenta desvantagens como as substâncias tóxicas que são emitidas para o meio ambiente, assim como os efeitos que estas repercutem adversamente na saúde dos seres humanos e outros organismos (Proshad et al., 2018). Acrescentando Nagy & Kuti (2016), que o plástico não é biodegradável na natureza, culminando na explicação fornecida por Thompson et al. (2005), que garante que todo o plástico introduzido nos oceanos ainda se encontra por mineralizar, num exemplo perfeito da longevidade dele.

2.3.2. OS IMPACTOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA

A corrente baixa percentagem de reciclagem de plástico aliada ao crescimento exponencial da produção dos mesmos leva ao aumento do material plástico desperdiçado que acaba como resíduo (Qureshi et al., 2020). Segundo Valinejadshoubi et al. (2013), é enorme a quantidade de garrafas plásticas que são depositadas diariamente no ambiente, fruto do desconhecimento das pessoas acerca do perigo que este material representa para a natureza, incluindo a própria vida humana.

De acordo com Obebe SB & Adamu AA (2020), são inúmeras as causas originárias da poluição plástica como as redes de pesca perdidas no oceano, os resíduos simples abandonados nas ruas que, devido à composição química do plástico, podem demorar centenas de anos a degradarem-se naturalmente, o que leva a uma acumulação contínua. Os efeitos são imensos, entre eles a poluição da água subterrânea, a morte de animais, a perturbação da cadeia alimentar natural, a poluição da terra e do ar, os efeitos negativos na saúde humana, entre outros. São sugeridas várias formas de prevenir a poluição derivada do plástico, como a redução da produção, a reutilização e a reciclagem, passando essencialmente pela educação de novos hábitos às pessoas, sugerindo também uma intervenção governamental através da criação de leis.

As indústrias encarregadas da manufatura de materiais plásticos são responsáveis pela libertação de grandes quantidades de poluentes que se revelam prejudiciais tanto para a saúde humana como para a

saúde animal, podendo causar problemas respiratórios, problemas ao nível do sistema nervoso e reduzindo a imunidade a doenças (Proshad et al., 2018).

Segundo Proshad et al. (2018), a deposição de resíduos plásticos depende de vários fatores como a direção do vento e das correntes marítimas, tendo a população humana um papel determinante sobre eles. As emissões tóxicas libertadas pelos plásticos impactam de forma negativa o meio ambiente, devido à sua combinação persistente e tóxica, através do ar, água e terra, revelando-se assim uma ameaça para todas as espécies.

Uma alternativa à deposição dos resíduos plásticos é proceder à reciclagem dos mesmos (Shent et al., 1999). De acordo com Alabi et al. (2019), pode-se definir a reciclagem como o processo de recuperação de resíduos plásticos que os transforma em produtos utilizáveis, tendo sido registados aumentos significativos ao longo dos anos na percentagem de plástico que é reciclado. A reciclagem de resíduos plásticos, que pode ser feita de várias formas, representa um grande desafio ao nível da proteção ambiental e dos recursos naturais (Vivero et al., 2005).

De acordo com Qureshi et al. (2020), na Europa, apenas 10% dos resíduos plásticos são reciclados, e há a necessidade de desenvolver novas técnicas de reciclagem, dado que as atuais tecnologias apresentam limitações que impedem a obtenção dos objetivos definidos para os plásticos.

Segundo Alabi et al. (2019), em 2018 a produção global anual de plástico era de trezentos e oitenta milhões de toneladas. Estima-se que, com o rápido aumento dos usos do plástico, em 2050 sejam produzidas um total acumulado de trinta e três mil milhões de toneladas de plástico (Y.-L. Wang et al., 2020).

2.3.3. O MATERIAL: PET-G

Segundo Dupaix & Boyce (2005), o PET-G (Polietileno Tereftalato Glicol) é um copolímero amorfo não cristalizante derivado do PET (Polietileno Tereftalato) que se encontra numa classe diferente de polímeros precisamente devido à sua especial propriedade já referida.

Na Figura 1, pode-se ver uma bobine do material utilizado ao longo do estudo.



Figura 1. Bobine de PET-G.

Este material frequentemente utilizado na impressão 3D é transparente e apresenta como característica principal a sua baixa condutividade térmica e a alta transmitância solar, aliado ao facto de ser reciclável, para além de que, em comparação com o PLA (uma alternativa para este projeto), é mais forte e apresenta uma maior rigidez (Sarakinioti et al., 2018).

Já Durgashyam et al. (2019), levou a cabo uma investigação relativa às propriedades de impressão com o PET-G e concluiu que este material apresenta boas propriedades de tração. O PET-G apresenta propriedades como uma alta resistência química e uma baixa capacidade de encolhimento, sendo de fácil impressão e garantindo uma boa adesão entre as camadas depositadas. O estudo realizado por Srinivasan et al. (2020) apresenta ainda uma tabela com as condições de impressão que consideram como sendo indicadas para o caso deste ser o material utilizado. Um outro estudo efetuado por Subbarao et al. (2021) apresenta as condições de impressão utilizadas relativas à análise mecânica de amostras constituídas por PET-G, apresentando-se ambos, respetivamente, na Tabela 1.

Tabela 1. Condições ideais de impressão utilizando o PET-G, de acordo com os estudos referidos.

Condições	Srinivasan et al. (2020)	Subbarao et al. (2021)
Temperatura da base	235 °C	235 °C
Diâmetro do filamento	1,75 mm	1,75 mm
Densidade do filamento	2,7 g/cc	1,27 g/cc
Temperatura de impressão	65 °C	60 °C

2.4. MANUFATURA ADITIVA

2.4.1. O QUE É, QUAIS AS SUAS APLICAÇÕES, VANTAGENS E DESVANTAGENS?

A manufatura aditiva é cada vez mais utilizada nos mais variados tipos de indústrias (Fu et al., 2021), e pode ser definida como a criação de um objeto sólido de três dimensões a partir de um ficheiro digital (Khosravani et al., 2020). No seu processo é utilizada a informação de um ficheiro do tipo CAD (Computer-Aided Design) que mais tarde é convertido num ficheiro do tipo STL (Stereolithography). O desenho efetuado em CAD é convertido em figuras geométricas simples, com recurso a um *software* computacional que contém a informação necessária relativa a cada camada que vai ser impressa (Özen et al., 2021). Esta técnica, devido às suas vantagens, é utilizada em vários setores distintos, que devido aos resultados experimentais que têm sido obtidos levam a um grande otimismo e esperança em relação ao potencial da manufatura aditiva (Wong & Hernandez, 2012).

Por sua vez, X. Wang et al. (2017), refere que a impressão 3D permite a criação de estruturas internas complexas sem os gastos materiais por norma associados, permitindo atingir um desempenho muito bom dos produtos obtidos. É, segundo o mesmo estudo, enumerada a aplicação da manufatura aditiva nas mais diversas indústrias, como a indústria aeroespacial, da arquitetura, da arte e da medicina, que devido às vantagens desta técnica acaba por se revelar útil em cada uma das áreas.

Segundo Elmrbet & Siegkas (2020), a manufatura aditiva pode ser uma opção rentável que se caracteriza pela sua capacidade de reduzir os gastos com materiais, o que por sua vez reduz também os desperdícios associados. A manufatura aditiva permite ainda ganhos consideráveis de tempo podendo o tempo para a criação dos protótipos ser facilmente reduzida de longos meses de espera para apenas algumas horas (Khosravani et al. 2020). A manufatura aditiva revela-se como uma enorme vantagem devido às maiores preocupações que urgem nas indústrias sobre a demora na produção que pode

influenciar a competitividade no mercado (Sood et al., 2010). As complexas geometrias internas das estruturas são impossíveis de obter através de métodos de manufatura tradicionais, surgindo assim a impressão 3D como um tipo de manufatura versátil e com ótimas perspectivas futuras (K. Wang et al., 2020).

Comparativamente com a técnica de manufatura tradicional, a manufatura aditiva permite o aumento da complexidade das peças impressas sem influenciar o custo de produção (Costabile et al., 2017). Segundo Pandzic et al. (2019), esta técnica apresenta a capacidade de não desperdiçar material sob a forma de resíduos quando comparada com outras técnicas tradicionais. Como refere Subbarao et al. (2021), esta tecnologia consome 90% do material que necessita reduzindo consideravelmente o desperdício produzido.

De uma forma mais sucinta, no estudo desenvolvido por Costabile et al. (2017), o processo de manufatura aditiva apresenta mais vantagens que desvantagens, mostrando assim um balanço positivo, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva.

Vantagens	Desvantagens
Liberdade de design e de criação	Custo associado à maquinaria
Dispensa ferramentas auxiliares de construção	Necessidade frequente de estruturas de suporte que geram gastos inúteis
Menor intervalo de tempo até os produtos atingirem o consumidor	Tempo de impressão varia consoante a peça
Desenvolvimento mais flexível	

2.4.2. OS DIFERENTES PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

Segundo Wong & Hernandez (2012), são inúmeros os processos de manufatura aditiva, entre os quais: *Stereolithography* (SLA); 3DP; *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou *Fused Filament Fabrication* (FFF); *Prometal*; *Selective Laser Sintering* (SLS); *Eletron Beam Melting* (EBM); *Laser Engineered Net Shaping* (LENS); *Laminated Object Manufacturing* (LOM); *Polyjet*.

Conforme o material desejado para utilizar no processo de manufatura aditiva, existem, segundo três métodos principais de impressão 3D disponíveis: os baseados em líquidos (SLA; FDM; *Polyjet*); os de base sólida (LOM); e os baseados em pó (3DP; *Prometa*; LENS; SLS; EBM) (Sekar et al., 2019).

De acordo com X. Wang et al. (2017) todos os processos visados apresentam as suas próprias vantagens e limitações associadas, sendo apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens das técnicas de manufatura aditiva.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
FDM	Baixo custo Alta resistência Capacidade de utilizar vários materiais	Possibilidade de o bico de extrusão entupir
SLA	Alta resolução da impressão	Limitada a poucos materiais Custo elevado
SLS	Alta resistência Facilidade de remoção dos materiais de suporte	Custo elevado
3DP	Baixo custo Capacidade de utilizar vários materiais Facilidade de remoção dos materiais de suporte	Baixa resistência mecânica Processo lento

O processo de manufatura aditiva que irá ser adotado no âmbito desta dissertação é o FFF (*Fused Filament Fabrication*), vulgarmente designado por FDM (*Fused Deposition Modelling*) (Moretti et al., 2021), é, segundo Bergonzi et al. (2021), uma tecnologia relativamente barata e simples, sendo que X. Wang et al. (2017), diz ser a única das técnicas que se processa com termoplásticos.

O FDM, é o mais comum processo de manufatura aditiva que, consiste num filamento plástico que alimenta a impressora, onde é aquecido até derreter, ponto no qual é extrudido sobre uma camada de espessura variável, sendo utilizados vários tipos de materiais distintos de acordo com a finalidade da impressão (Wong & Hernandez, 2012).

De acordo com Elmrabet & Siegkas (2020), os eixos axiais X e Y movem-se num plano horizontal enquanto a plataforma de impressão 3D move-se verticalmente segundo o eixo axial Z. À medida que o material se deposita na base, segundo o padrão definido, sofre uma rápida solidificação. Segundo é referido por Fu et al. (2021), este é um processo que se repete até a impressão estar concluída.

As principais vantagens deste processo residem no facto de não ser necessário realizar um processamento químico, não serem necessárias resinas para realizar a cura, bem como a maquinaria ser mais barata e os materiais resultarem de um processo mais económico (Wong & Hernandez, 2012). Segundo X. Wang et al. (2017), para além do reduzido custo, este processo garante rapidez e simplicidade de processos, permitindo ainda a utilização de diversos materiais em simultâneo.

As desvantagens associadas ao FDM são que a resolução no eixo axial Z é baixa quando comparado com outros processos de manufatura aditiva (Wong & Hernandez, 2012). Segundo Fu et al. (2021), outras desvantagens associadas são a menor fiabilidade relativamente a outras técnicas de manufatura aditiva, e a ocorrência de falhas no processo que resultam em erros na impressão devido à má técnica dos utilizadores, registando-se por este motivo cerca de 20% dos erros de impressão. De acordo com o estudo levado a cabo por X. Wang et al. (2017), outros tipos de desvantagens do processo de impressão adotado é a obrigatoriedade de os materiais utilizados estarem na forma de filamento para permitir o processo de extrusão, assim como a limitação do material utilizado ter uma viscosidade adequada (alta o suficiente para garantir o suporte estrutural e baixa o suficiente para permitir a extrusão) quando derretido. A remoção da estrutura de suporte pode também ser um processo difícil.

De maneira a tornar possível a impressão de formas mais complexas, é necessária a utilização de um material de suporte removível, que em certas estruturas e tipos de impressão, pode mesmo representar até 50% do material necessário para a impressão (Chi-Fung Li et al., 2019). Segundo Md Akil et al. (2020) o material de suporte tem um papel importante na prática da impressão 3D pois permite evitar a deformação bem como melhorar a estabilidade da estrutura a ser impressa. Estas estruturas são por vezes necessárias e por serem removidas após a impressão, geram gastos de material, tempo e energia (Jiang et al., 2018).

2.4.3. FATORES INFLUENCIADORES DA QUALIDADE DE IMPRESSÃO

Segundo Fu et al. (2021), o processo de manufatura aditiva pela técnica adotada (FDM) é muito sensível às condições do ambiente em que está inserido. Ainda de acordo com o mesmo estudo, existem duas

formas de controlar a qualidade de impressão relativamente ao processo FDM: monitorizar o estado de conservação da impressora e atentar na detecção de defeitos no produto durante a impressão.

Vários parâmetros influenciam o desempenho mecânico das peças impressas em 3D como a orientação de impressão, a temperatura de extrusão, a espessura da camada, o diâmetro do bico, a velocidade de impressão, a densidade padrão e orientação do preenchimento, entre outros (Aloyaydi et al., 2019).

Diferentes níveis de *infill* podem colocar em causa a integridade estrutural do objeto impresso (Fu et al., 2021). De acordo com o mesmo estudo, a geometria interna de um objeto pode ser afetada de inúmeras formas, dependendo assim de parâmetros como o entupimento do bico, uma errada calibração da temperatura da plataforma que vai servir de base a impressão, ou até mesmo uma má calibração do nível da altura.

2.4.4. INFILL

De acordo com K. Wang et al. (2020), a geometria interna é um dos fatores determinantes para evitar a deformação das peças. No mesmo estudo, a amostra que apresenta uma estrutura interna com geometria hexagonal demonstrou valores superiores de resistência à tração embora menor capacidade de alongamento relativamente às amostras com estrutura interna com geometria triangular. Os resultados demonstraram que a percentagem de *infill* está diretamente relacionada com a resistência à tração, e quanto maior for esta percentagem maior serão também as imperfeições associadas derivadas de defeitos no processo de impressão. A influência da geometria interna e da percentagem de *infill* relativamente à capacidade de absorção de energia é limitada.

De acordo com Bergonzi et al. (2021), e após terem sido estudadas várias amostras com diferentes geometrias internas através da realização de testes com iguais condições de temperatura e de percentagem de *infill*, concluiu-se que a geometria interna definida interfere com o desempenho mecânico da amostra.

Segundo Kamau-Devers et al. (2021), quanto mais complexa for a geometria interna maior será a energia dissipada, sendo que o controlo destas geometrias pode levar a uma melhoria das propriedades isolantes, uma vez que o mesmo estudo indica que a redução da condutividade térmica pode ser conseguida através da introdução de vazios de ar (o ar apresenta uma condutividade térmica de 0,023 (W/(m*K))), já o PLA (Ácido Polilático), segundo (Lebedev et al., 2017), apresenta uma condutividade

térmica que pode variar entre 0,193 (W/(m*K)) até 2,73 (W/(m*K)), valores sempre superiores aos apresentados pelo ar. De todas as amostras testadas, no estudo referido, as amostras com 25% de *infill* apresentaram os melhores resultados ao nível do isolamento térmico quando em comparação com as restantes amostras testadas com diferentes percentagens de *infill* (25%, 50%, 75% e 100%).

No estudo levado a cabo por Aloyaydi et al. (2019), foram impressas amostras com variadas percentagens de *infill* (40%, 60%, 80% e 100%). Os resultados demonstraram que as características de flexão têm uma forte ligação à percentagem de *infill* adotada em cada amostra. A capacidade de absorver energia aumenta drasticamente com 80% e 100% de *infill* em relação às amostras com 40% e 60%, possivelmente devido à redução de espaços vazios nas amostras com níveis mais elevados de *infill*. Do mesmo modo, verifica-se um aumento bastante significativo no módulo de resistência à flexão nas amostras com percentagens de *infill* de 80% e 100% quando comparadas com as de 40% e 60%, como é demonstrado na Figura 2 e na Figura 3. Em suma, os resultados obtidos sugerem que a percentagem de 80% é a mais adequada para o parâmetro estudado.

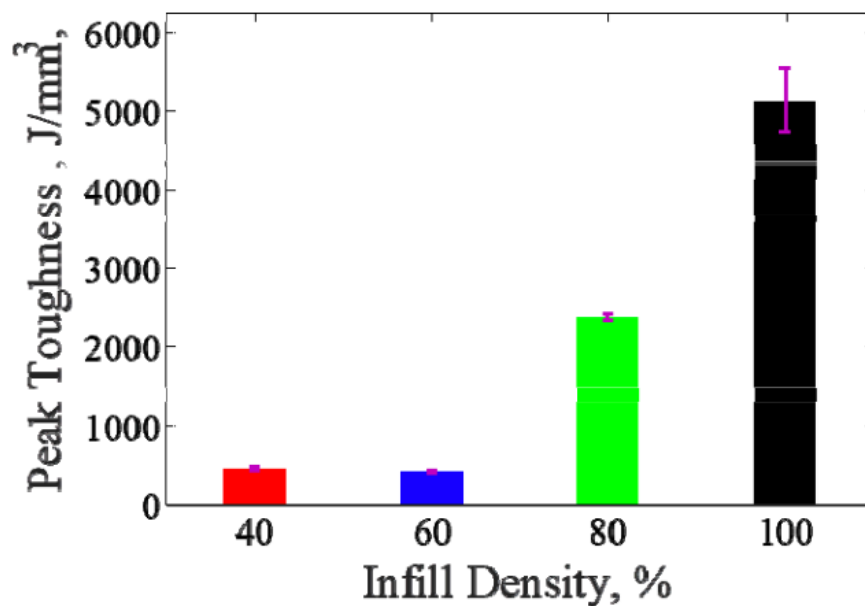


Figura 2. Resistência média das amostras de PLA segundo a percentagem de *infill*.

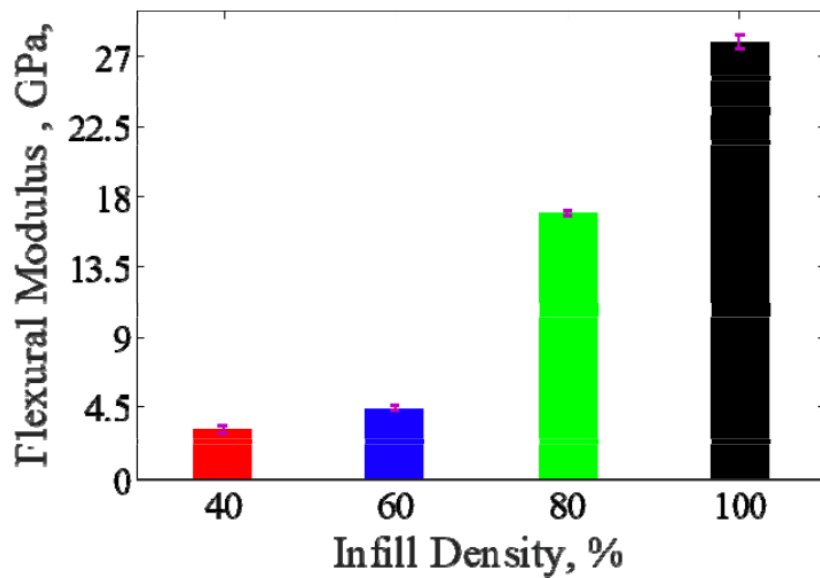


Figura 3. Resistência médias das amostras de PLA segundo a percentagem de *infill*.

No estudo desenvolvido por Alvarez et al. (2016), foi analisada a influência da percentagem de *infill* nas propriedades mecânicas dos objetos impressos em 3D através da técnica FDM. Foram registados os resultados obtidos ao nível da máxima força de tensão, da máxima força de impacto e do tempo de impressão. Todos os outros parâmetros de impressão foram mantidos constantes, variando apenas aquele que interessava analisar: a percentagem de *infill* (de 5% em 5% dos 0% até aos 100%). Após a análise dos resultados foi possível concluir que se recomendam menores percentagens de *infill* para uma impressão mais rápida, embora isso resulte numa menor resistência mecânica. Já se o objetivo passa por ter uma maior resistência mecânica, esta é diretamente proporcional à percentagem de *infill* utilizada.

Num outro estudo, desenvolvido por Fernandez-Vicente et al. (2016), foram seleccionados uma série de parâmetros comuns, fixos, de forma a poder comparar os resultados obtidos em relação às variantes da geometria e da percentagem de *infill*. As geometrias internas testadas foram a retangular, hexagonal e linear, com percentagens de *infill* de 20%, 50% e 100%. Após a realização dos testes, verificou-se que quanto maior a percentagem de *infill*, menor serão os vazios no interior da estrutura, resultando assim numa maior resistência à tração. Em situações de igual *infill*, a estrutura com geometria interna hexagonal apresenta uma resistência à tração ligeiramente superior quando comparada com as restantes geometrias analisadas.

No estudo desenvolvido por Yadav et al. (2021), foram impressas amostras com seis diferentes tipos de geometrias internas designadas por: Curva de Hilbert; Hexagonal; Linear; Retilínea; Curva de Arquimedes; Espiral Octogonal. A resistência à compressão de cada amostra foi alvo de análise, para 4 níveis distintos de *infill* (de 20% em 20% desde os 20% até aos 80%). Contudo, o padrão designado por Curva de Hilbert foi aquele que verificou níveis bastante superiores de resistência à compressão, seguido do Retilíneo, quando comparados com os restantes. A geometria interna que revelou piores resultados ao nível da resistência à compressão foi a Espiral Octogonal.

Já Srinivasan et al. (2020), através da análise de outros estudos, mostra que a geometria interna da amostra impressa afeta o desempenho mecânico dela, sendo que das analisadas (hexagonal, retilínea e concêntrica), a retilínea foi a que se apresentou mais resistente enquanto a concêntrica apresentou uma maior capacidade de alongamento.

2.4.5. A MANUFATURA ADITIVA E A MODELAÇÃO POR INJEÇÃO

O processo de modelação por injeção é um dos mais versáteis e importantes processos de manufatura, uma vez que é capaz de processar e produzir, em quantidade, objetos plásticos com dificuldade de produção elevada (Chen & Turng, 2005).

A técnica de modelação por injeção é a mais utilizada no fabrico de compostos plásticos. O aumento da procura de produtos plásticos leva à necessidade de aumentar também a eficiência da produção deles. A qualidade final do produto está dependente de diversos parâmetros como a matéria-prima utilizada e a forma desejada para o produto. Atualmente, mais de um terço de todos os termoplásticos são obtidos através da modelação por injeção, que é um processo cíclico que consiste na fase da plastificação e na fase da injeção (Khosravani & Nasiri, 2020).

Na primeira fase, a fase da plastificação, a máquina é alimentada pelo plástico utilizado que após dar entrada no canal é empurrado pelos parafusos que deram início ao seu movimento rotativo após a entrada do plástico. O material é assim forçado e derrete devido ao aquecimento gerado pela rotação do parafuso. Após derretido, o material é conduzido até à ponta do parafuso até se obter o volume desejado de material, momento em que o parafuso para a rotação, significando o final da fase de plastificação. A fase da injeção é constituída por 4 fases: *Filling* (Obturação) onde o molde é mantido vazio, até o parafuso avançar e forçar o derretimento do material na cavidade do molde; *Packing* (Embalagem) quando o

molde está cheio, o material arrefece e encolhe permitindo a adição de mais material para compensar a diminuição de volume ocorrida; *Cooling* (Arrefecimento) ocorre a solidificação do material enquanto o parafuso começa a mover-se no sentido contrário dando início à última fase; *Ejection* (Expulsão) quando todas as partes já estão solidificadas o molde abre e expulsa o objeto. Termina assim o ciclo, recomeçando novamente (Zheng et al., 2011).

Segundo Franchetti & Kress (2017) o método da modelação por injeção apresenta uma melhor relação ao nível económico para a produção de grandes quantidades de peças, podendo mesmo produzir em maiores quantidades ao longo do tempo, comparativamente com a técnica da manufatura aditiva que oferece outro tipo de benefícios como a rápida prototipagem, a produção em menores quantidades e a capacidade de executar peças com elevado grau de complexidade.

3. METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1. ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO

A estrutura da metodologia adotada nesta investigação pode ser dividida em três principais fases, distintas, mas interligadas.

Numa fase inicial foi efetuada uma extensa revisão bibliográfica através da consulta de publicações já existentes e disponibilizadas que se consideraram relevantes para o desenvolvimento do tema, onde foram recolhidas e apresentadas informações acerca da necessidade e importância de prestar uma especial atenção ao setor dos edifícios, essencialmente no âmbito do mais recente Pacto Ecológico Europeu. A manufatura aditiva pode desempenhar um papel importante na correção de algumas das necessidades inerentes a este setor. Foi por isso feita uma revisão bibliográfica mais concisa relativamente a esta técnica de forma a perceber quais as melhores especificações a adotar para o caso de estudo em questão para que fosse possível a obtenção do conjunto de opções que, *à priori*, oferecerão mais rentabilidade, sem nunca descurar a integração de resíduos plásticos que são uma outra fonte de enorme poluição ambiental, tentando com isto inculcar e praticar o inovador e importante conceito de economia circular.

Na segunda fase da investigação foi efetuada a impressão de um conjunto de amostras para posterior ensaio. Após a revisão de literatura ter sido efetuada, foi possível efetuar uma seleção preliminar das melhores características que devem ser tidas em conta para obter as finalidades desejadas. Contudo, nenhum estudo foi ao encontro daquilo que se pretende desenvolver, e por esse motivo foi necessário realizar uma análise preliminar dos doze tipos de geometrias internas disponibilizados pelo *software* PrusaSlicer. Deste modo, optou-se por utilizar uma igual percentagem de *infill* para todas elas, para que de seguida fossem submetidas aos primeiros testes, em condições de igualdade. Esta primeira análise permitiu perceber quais as três geometrias internas que apresentam melhores resultados em cada teste realizado.

De seguida, e após serem obtidas as três melhores geometrias internas de acordo com os resultados dos ensaios anteriores, serão impressas estas três geometrias com diferentes percentagens de *infill* que vão variar de igual forma de acordo com a especificidade dos ensaios (parâmetros como as dimensões das amostras influenciam diretamente o tempo de impressão assim como os gastos de material). Estas

novas amostras serão submetidas à realização dos mesmos testes de resistência térmica e mecânica e será possível realizar, na fase seguinte, uma avaliação mais concisa das amostras impressas para permitir comparar e compreender quais as opções que podem vir a ser mais viáveis de incorporarem a fachada de um edifício.

Na terceira, e última fase, os resultados obtidos anteriormente serão alvo de uma análise detalhada com o objetivo de compreender o que as diferentes soluções alvo de estudo podem oferecer, e quais as mais adequadas aos cenários em causa.

Estas soluções apresentam custos – para além do seu desempenho tanto térmico como mecânico – que se apresentam como um dos fatores com um peso considerável na avaliação das geometrias. Por este motivo os resultados serão estudados sob a forma de um diagrama triangular – obtido por recurso ao *software* Mixtri2.0 – por forma a incluir estes três parâmetros em conjunto, numa análise global, permitindo uma simples e prática interpretação dos resultados.

3.2. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. A IMPRESSORA

Situada no departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, mais precisamente no Laboratório de Física e Tecnologia das Construções, a impressora utilizada para imprimir os painéis a estudar nesta dissertação foi o modelo Extreme 1500 Pro da marca Builder, que se mostra na Figura 4.

A impressora apresenta as seguintes dimensões (1100x500x820) mm e faz uso da tecnologia de impressão FFF/FDM, já analisada anteriormente. Apresenta três diferentes diâmetros do bico (0,4; 0,8; 1,2) mm, dependendo a velocidade de impressão deste diâmetro e da geometria selecionada, mas que pode atingir os 300mm/s.

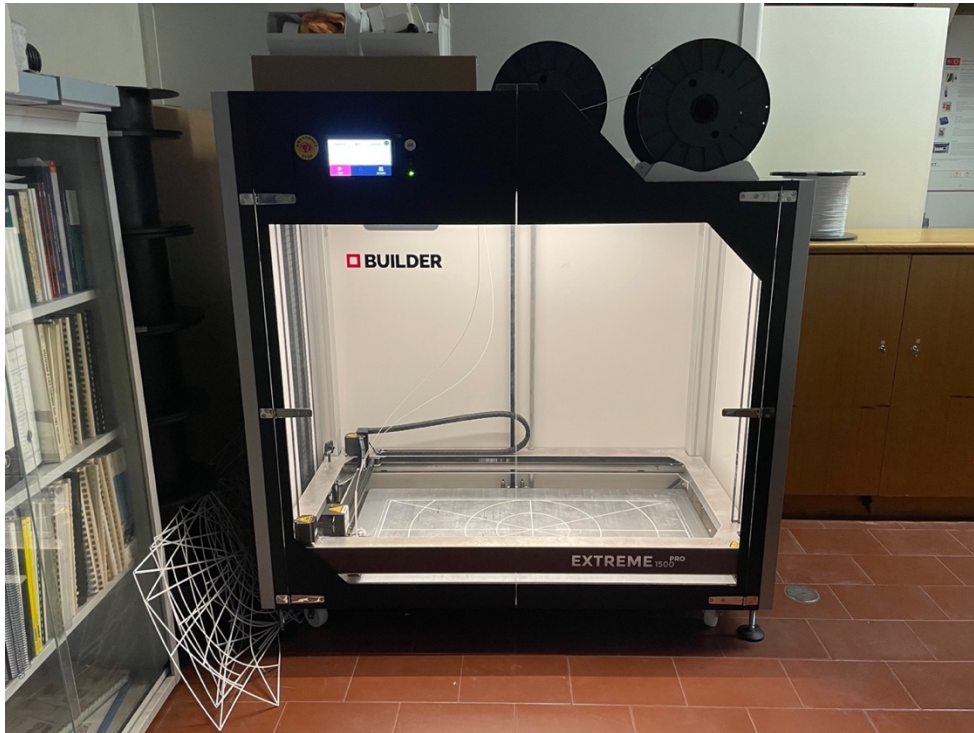


Figura 4. Impressora 3D.

Para uma adequada impressão, e enquanto o material desejado para efetuar as impressões dos painéis não era disponibilizado, fizeram-se os primeiros testes com outros materiais fornecidos, de forma a preparar e conhecer a impressora e as suas características, para conseguir a otimização da qualidade da impressão aliada ao tempo necessário para tal.

O material utilizado nas impressões das amostras a serem alvo de testes foi o PET-G (Polietileno Tereftalato Glicol), que já foi referido em 2.3.3.

3.2.2. GEOMETRIAS INTERNAS

Foram inicialmente testadas, em condições de igualdade, doze geometrias internas disponibilizadas pelo *software* PrusaSlicer, de forma a se poder selecionar criteriosamente as geometrias que apresentam melhor rendimento de acordo com os ensaios a que estarão sujeitas.

O *software* apresenta um total de dezasseis geometrias internas distintas, apresentadas na Figura 5, sendo elas: 3D Honeycomb; Adaptive Cubic; Aligned Rectilinear; Archimedean Chords; Concentric; Cubic; Grid; Gyroid; Hilbert Curve; Honeycomb; Line; Octagram Spiral; Retilinear; Stars; Triangles. Destas dezasseis geometrias enumeradas, quatro delas foram excluídas: Adaptive Cubic, Aligned Retilinear, Archimedean Chords e Support Cubic.

Estas quatro geometrias foram excluídas por diferentes razões. As geometrias Adaptive Cubic, Support Cubic e Aligned Retilinear foram excluídas devido às semelhanças com outras geometrias consideradas “principais”, respetivamente Cubic e Retilinear. Já a geometria Archimedean Chords foi eliminada quando ainda em estado de análise foi possível perceber a fragilidade dela.

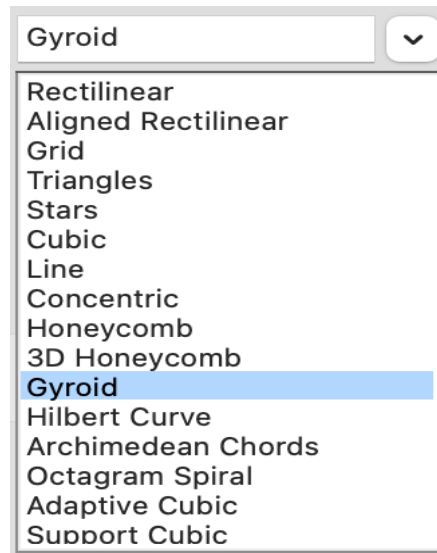


Figura 5. Geometrias disponibilizadas pelo *software*.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível ver uma amostra real de cada uma das geometrias internas utilizadas nesta dissertação.

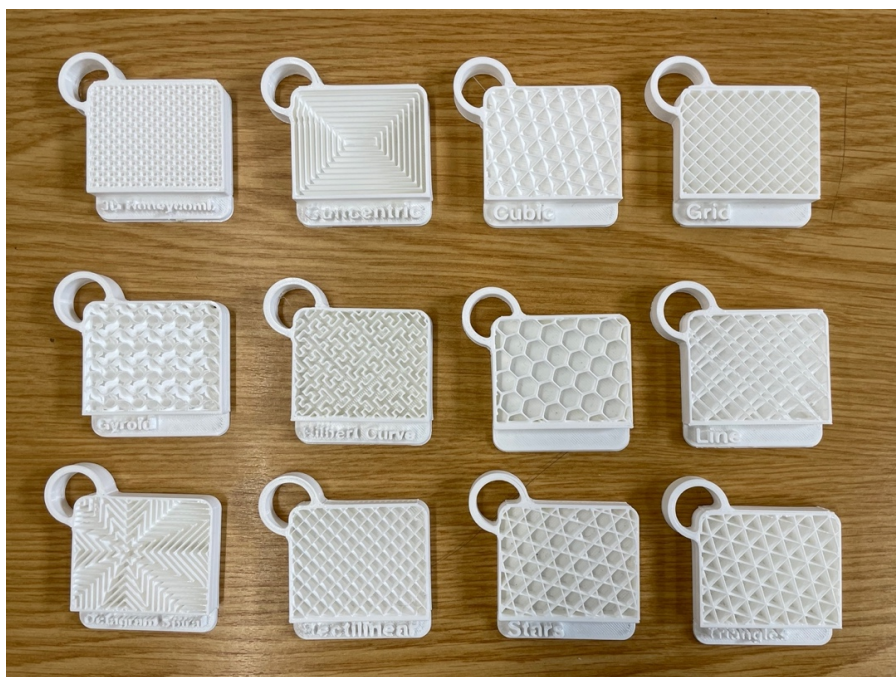


Figura 6. Exemplos das várias geometrias utilizadas na dissertação.

3.2.3. ENSAIOS

3.2.3.1. ENSAIOS TÉRMICOS

Para a realização dos ensaios térmicos foram impressos dois painéis subdivididos em seis partes iguais, cada uma delas com uma geometria diferente, com percentagens de *infill* de 25% comum a todas as amostras. A modelação foi realizada no *software* Shapr3D e a configuração dos painéis foi realizada no *software* PrusaSlicer.

É possível reparar, na Figura 7, que os seis painéis com as diferentes geometrias foram ligeiramente deslocados para fora de forma a conseguir-se efetuar a distinção deles, permitindo manter uma ordem de referência, evitando assim possíveis trocas de geometrias e consequentes resultados falsos nos testes.

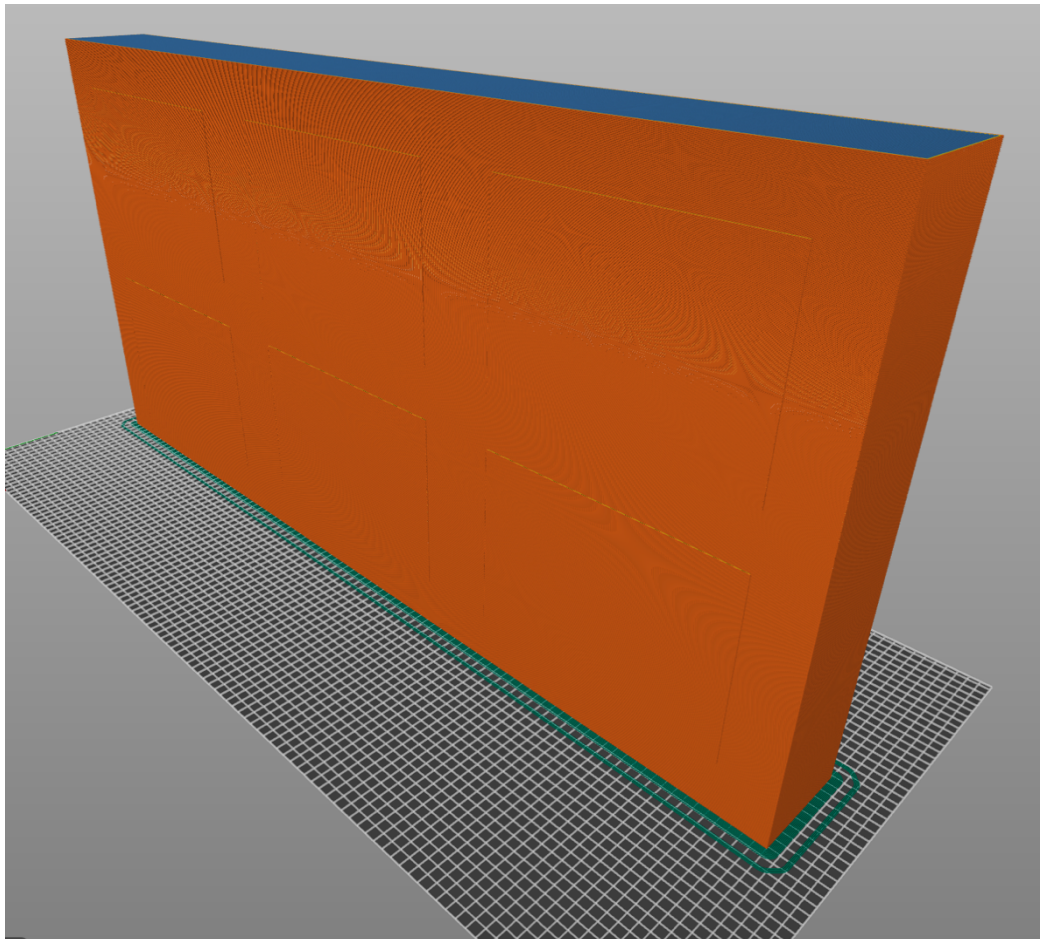


Figura 7. Modelação dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.

Dadas as grandes dimensões do painel, este apresenta estruturas de suporte não removíveis. Como se pode ver na Figura 8, estas estruturas foram maximizadas para reduzir os gastos materiais assim como os custos de impressão associados, reduzindo o tempo de impressão dela e tornando a estrutura mais leve.

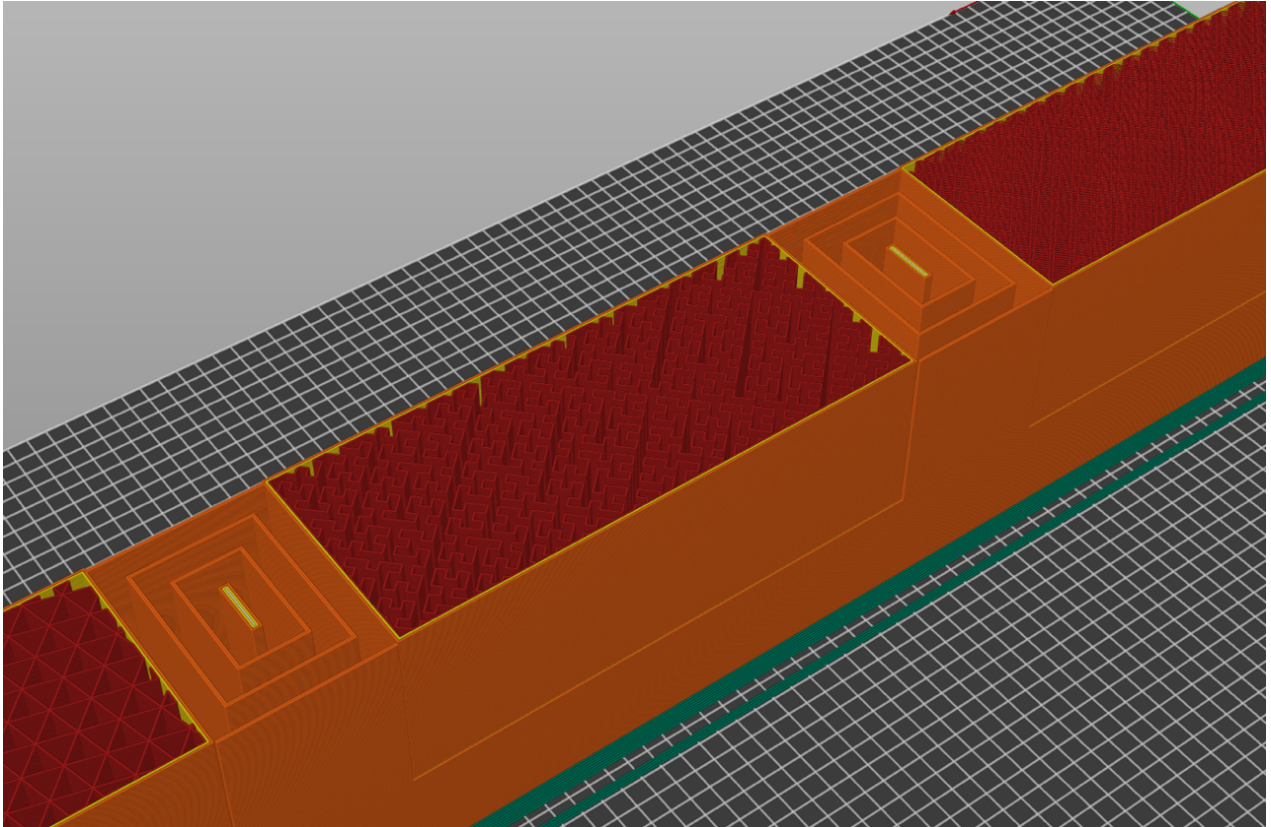


Figura 8. Vista interior dos painéis.

Após terminar a configuração passou-se ao processo de impressão, que se mostra na Figura 9 e na Figura 10.

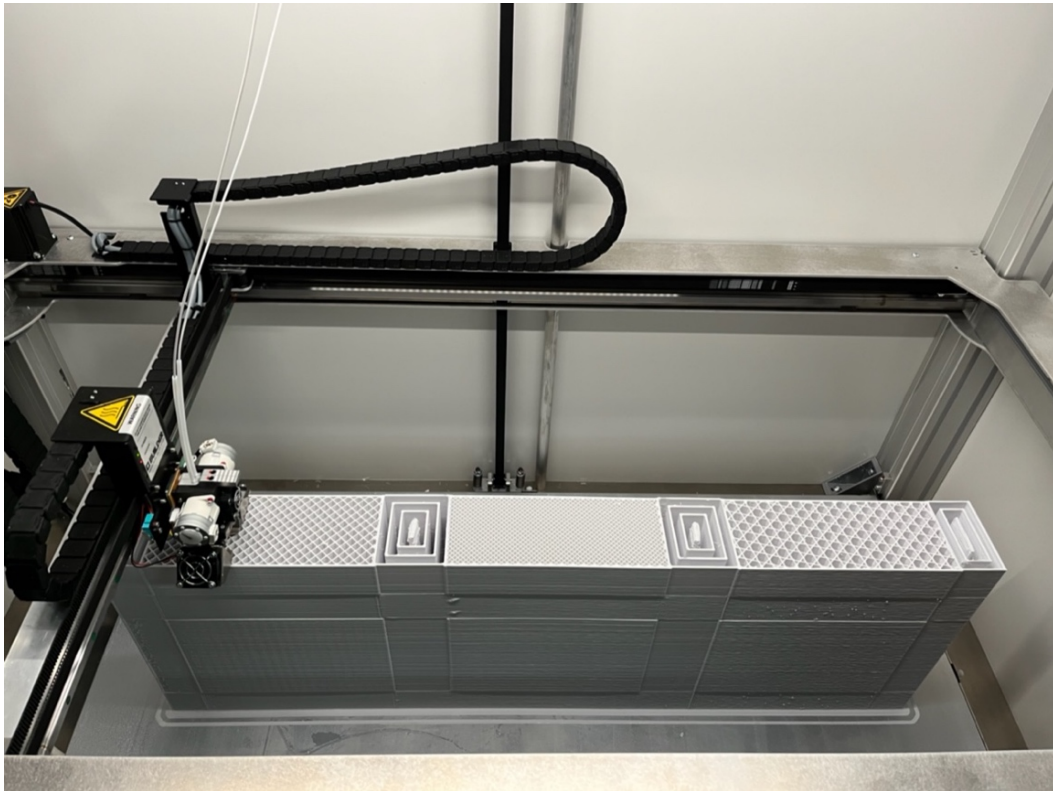


Figura 9. Impressão de um dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.

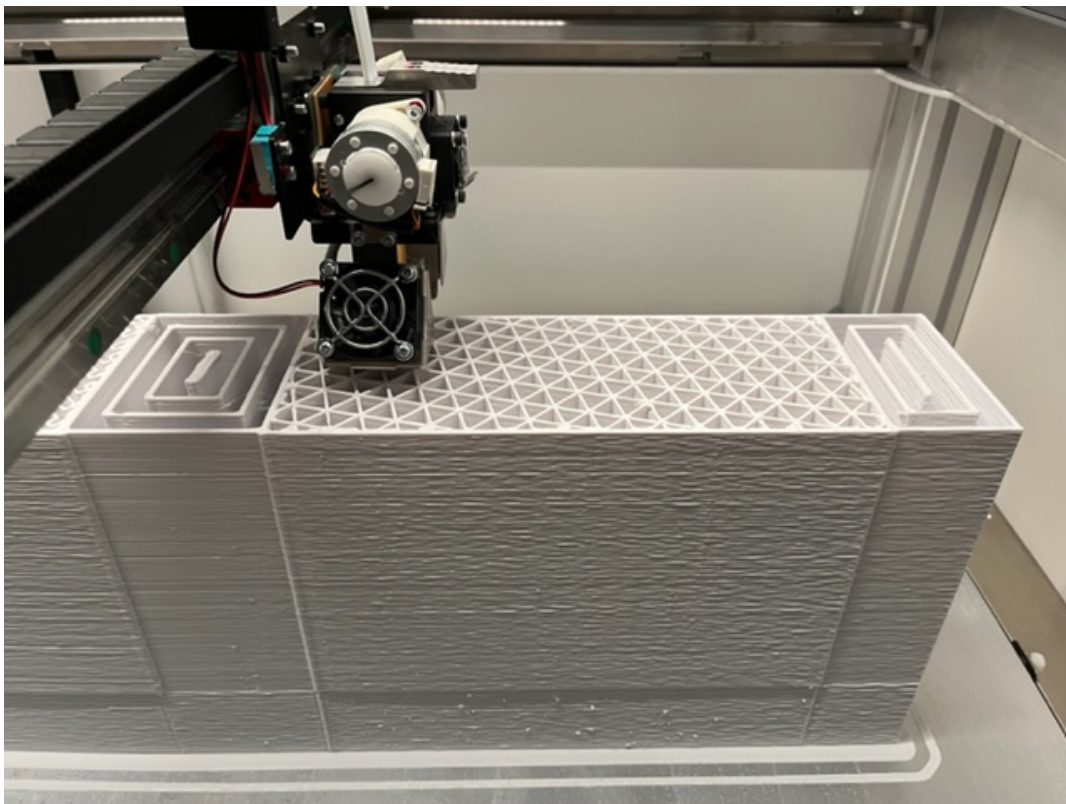


Figura 10. Pormenor do interior da impressão de um dos painéis sujeitos a ensaios térmicos.

O resultado desta impressão é apresentado na Figura 11, já com o painel, totalmente impresso e pronto a ser sujeito aos testes de carácter térmico.

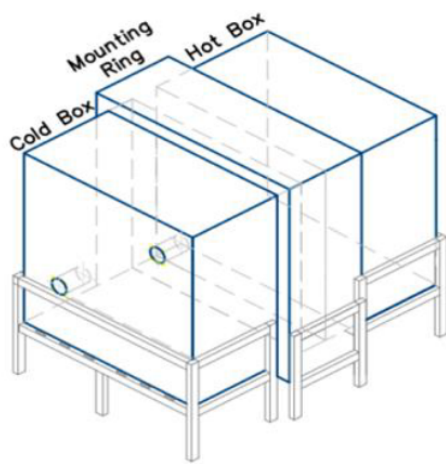


Figura 11. Exemplar totalmente impresso.

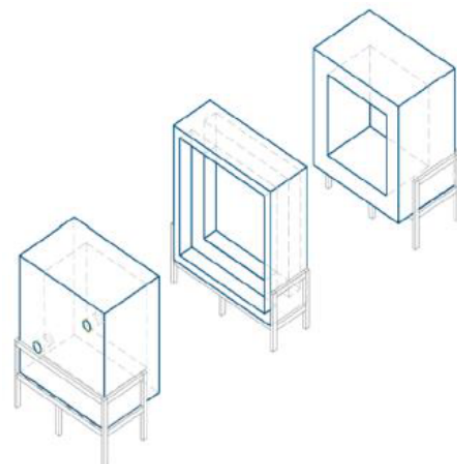
No LFCT – Laboratório de Física e Tecnologia das Construções – presente no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade do Minho, encontra-se o equipamento que permitiu a realização dos ensaios de avaliação da resistência térmica que permite caracterizar as propriedades térmicas das amostras dos painéis impressos.

Este equipamento, denominado por *Hot Box*, esquematicamente representado na Figura 12, é constituído por duas câmaras – fria e quente – apresentando como dimensões externas (2,0 x 1,4 x 1,6)

m^3 , com aproximadamente 1 m^3 de volume interno. As câmaras encontram-se ligadas por uma parede central onde foi colocado o painel com as amostras alvo de teste. A envolvente da *Hot Box* é formada por XPS – Poliestireno Extrudido – de forma a reduzir as trocas térmicas com o ambiente, apresentando como características a sua espessura de 20 cm e a sua transmissividade térmica (U) igual a $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



a)



b)



c)



d)

Figura 12. *Hot Box*.
a) Esquema da *Hot Box* fechada.
b) Esquema da *Hot Box* aberta.
c) Fotografia da *Hot Box*.
d) Fotografia da câmara fria da *Hot Box*.

A realização destes ensaios deu-se segundo a norma ISO 9869-1:2014. Foram utilizados fluxímetros para a medição do fluxo de calor e termopares para a medição da temperatura superficial, respetivamente. Estes equipamentos apresentam dimensões de (30X30X3) mm, operando num intervalo de temperatura entre -50°C até 80°C, e efetuavam de forma automática os cálculos para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica que tornaria possível o conhecimento da resistência térmica de cada painel. Do lado da câmara fria, foram colocados os fluxímetros e os termopares, e os dados a assinalar foram registados por meio de um *datalogger*. Por fim, e de modo a garantir um isolamento mais capaz, todos os provetes foram isolados com recurso a silicone, como é possível verificar na Figura 13.

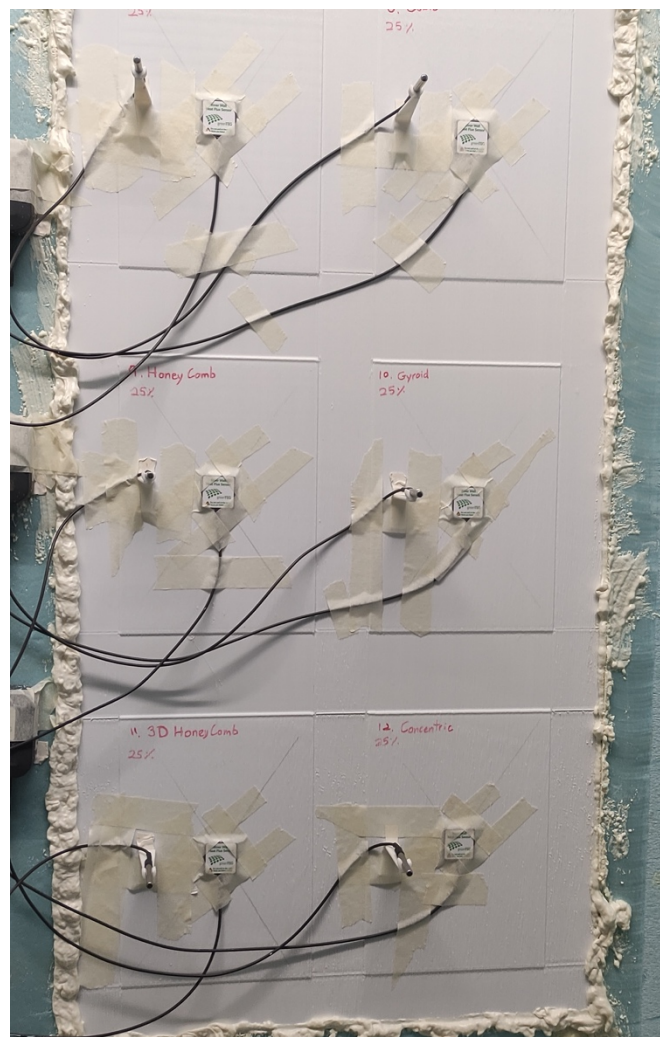


Figura 13. Painel submetido a um ensaio térmico.

Durante a realização dos ensaios, manteve-se a câmara quente a uma temperatura constante através da utilização de um sistema de aquecimento. Já relativamente à câmara fria, esta possui duas aberturas para realizar a ventilação, ou seja, permitindo que haja trocas de ar no interior da câmara, sendo este processo necessário para se conseguir manter condições de fluxo de calor uniformes em cada ensaio.

3.2.3.2. ENSAIOS MECÂNICOS

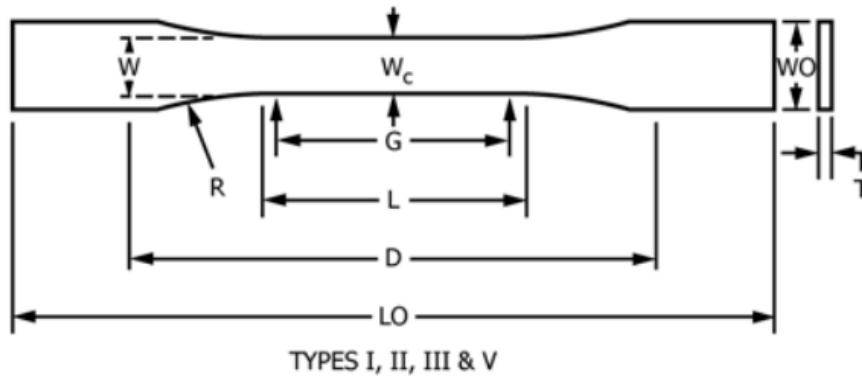
Estes ensaios dividem-se em dois tipos distintos – os de tração e os de flexão – ambos serão especificados de seguida. Contudo, para a sua realização, foi utilizado o mesmo equipamento, surgindo apenas a necessidade lógica de efetuar a troca dos encaixes para permitir a realização dos diferentes ensaios.

Presente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, a MTS Exceed E45 é uma máquina que permite a realização manual de testes universais (tração, compressão, flexão, entre outras), suportando cargas até 300 kN.

A facilidade com que se consegue utilizar e tirar partido da versatilidade da máquina permite uma rápida e eficaz realização dos ensaios, sendo que para ambos apenas diferem as peças de suporte utilizadas.

3.2.3.2.1. ENSAIOS À TRAÇÃO

Estes ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D368 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* a partir da qual foram retiradas as dimensões e o tipo das amostras a serem testadas, representadas na Figura 14, assim como o número de ensaios ao qual cada tipo de amostra deve estar sujeito (cinco).



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
LO—Length overall, min ^H	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
D—Distance between grips	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
R—Radius of fillet	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
T—Thickness	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
RO—Outer radius (Type IV)	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Figura 14. Esquema representativo e dimensões das amostras a serem testadas.

Foram seguidas as dimensões designadas por “Type I” uma vez que são as que mais se adequam ao equipamento utilizado para realizar os ensaios.

De seguida, com recurso aos *softwares* Shapr3D e PrusaSlicer fez-se a modelação das peças de acordo com a norma vigente, como mostra a Figura 15, para levar a cabo a impressão delas.

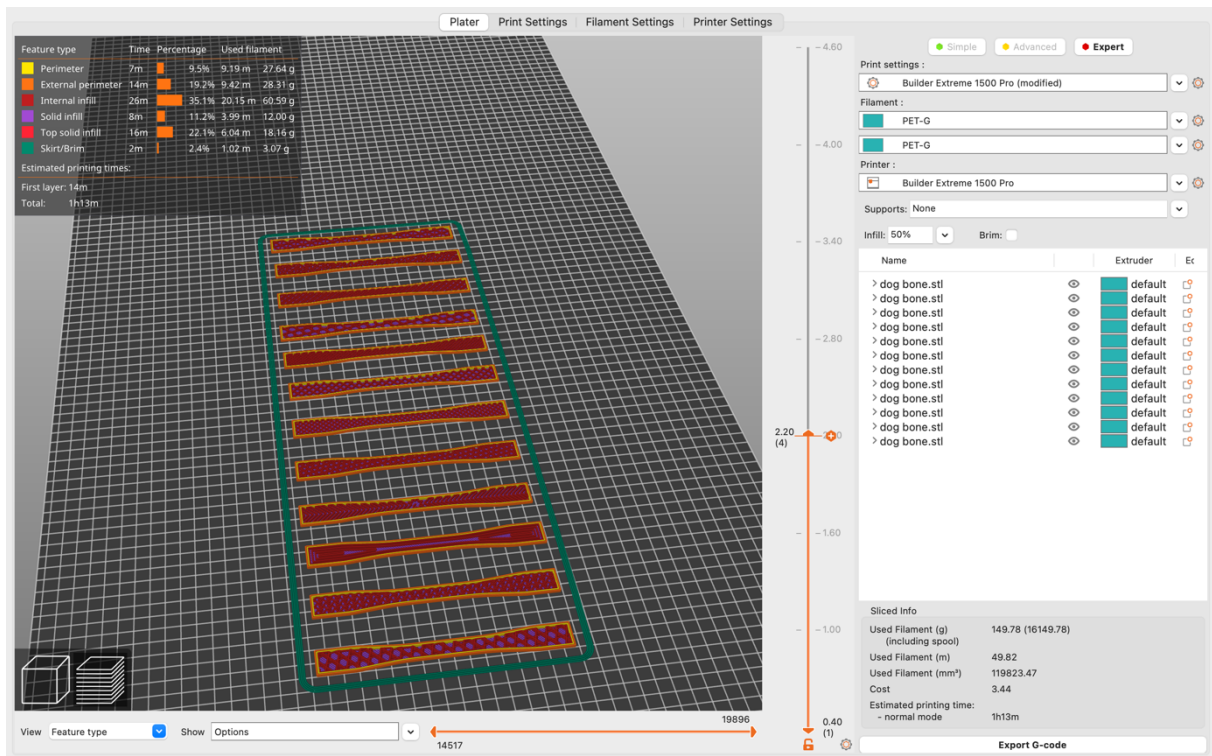


Figura 15. Modelação das peças que serão alvo de testes de tração.

As doze geometrias foram impressas com igual percentagem de *infill* (50%), devendo-se esta opção a dois motivos principais: a igualdade de critérios para todas as amostras aquando da realização dos testes e a necessidade de uma percentagem de *infill* elevada, devido às reduzidas dimensões das amostras, de forma que cada geometria estivesse suficientemente presente nas amostras para serem levadas a teste permitindo uma análise mais real.

Na Figura 16 é possível verificar o resultado da impressão das peças modeladas, e de seguida, na Figura 17 uma amostra pormenorizada de uma das sessenta peças alvo de teste.



Figura 16. Resultado da impressão das peças anteriormente moldadas em *software*.

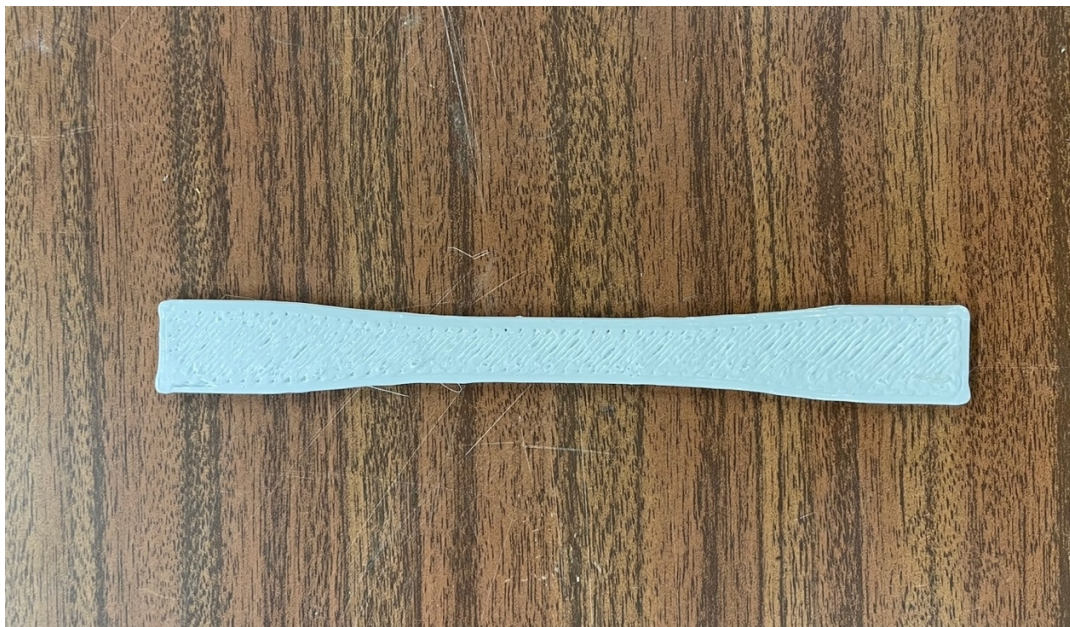


Figura 17. Amostra de uma peça que será alvo de teste de tração.

O equipamento utilizado para a realização deste tipo de testes já foi apresentado anteriormente, pelo que as peças de suporte indicadas e utilizadas para estes testes encontram-se na Figura 18.



Figura 18. Exemplo de teste à tração.

Segundo a norma seguida, as peças foram marcadas com uma distância de 2,5 cm desde ambas as extremidades para o seu interior, marcação necessária para definir a distância que a peça seria colocada no equipamento de forma a realizar o teste, como é possível ver na Figura 19, de uma amostra prestes a ser ensaiada.

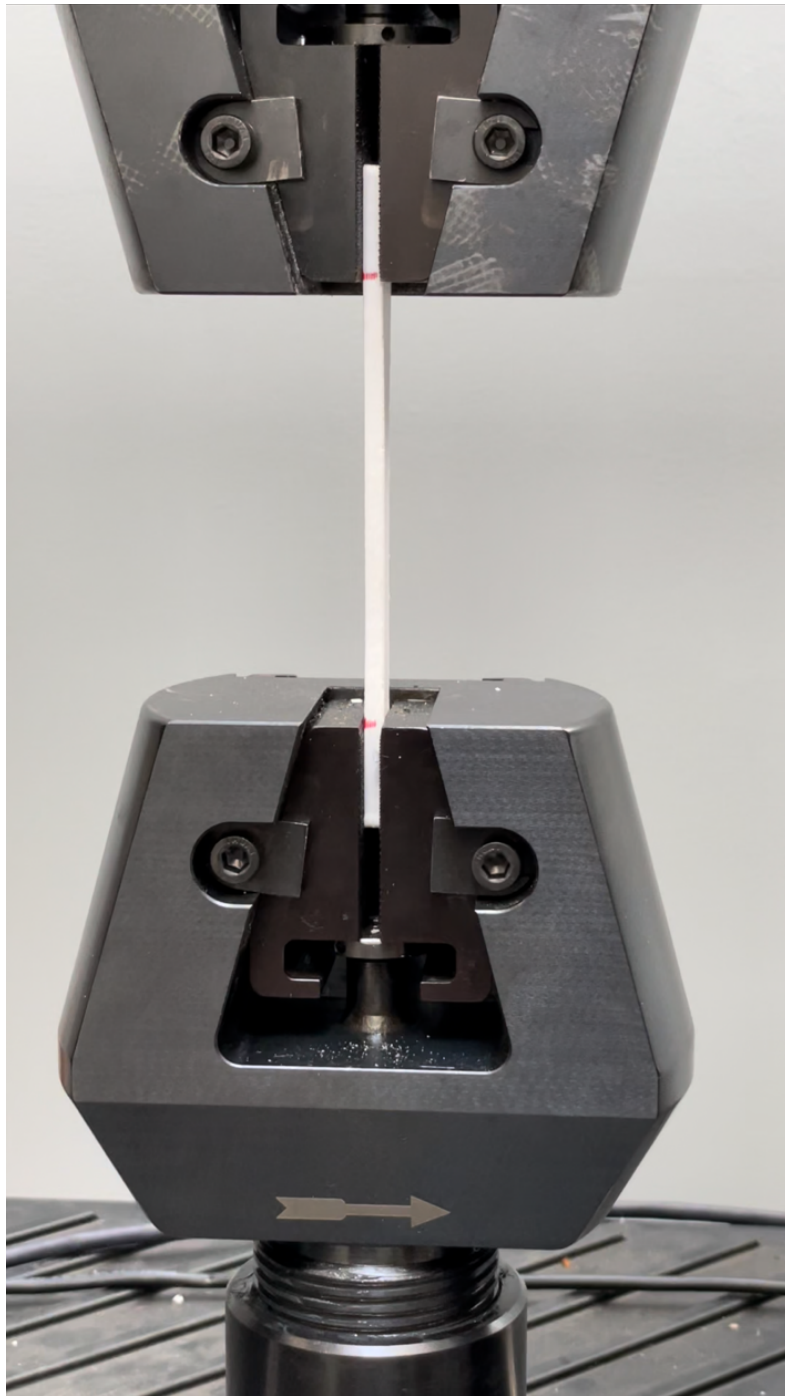


Figura 19. Disposição da peça prestes a ser ensaiada.

Com o decorrer do teste, as peças ao serem tracionadas entravam em cedência, sendo o resultado mais comum o apresentado na Figura 20.



Figura 20. Resultado de um ensaio à tração.

3.2.3.2.2. ENSAIOS À FLEXÃO

Estes ensaios realizaram-se de acordo com a norma ASTM C393 – *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, de onde se retiraram as dimensões pretendidas e as formas para as peças a serem impressas, apresentado na Figura 21, e posteriormente testadas de acordo com a mesma norma.

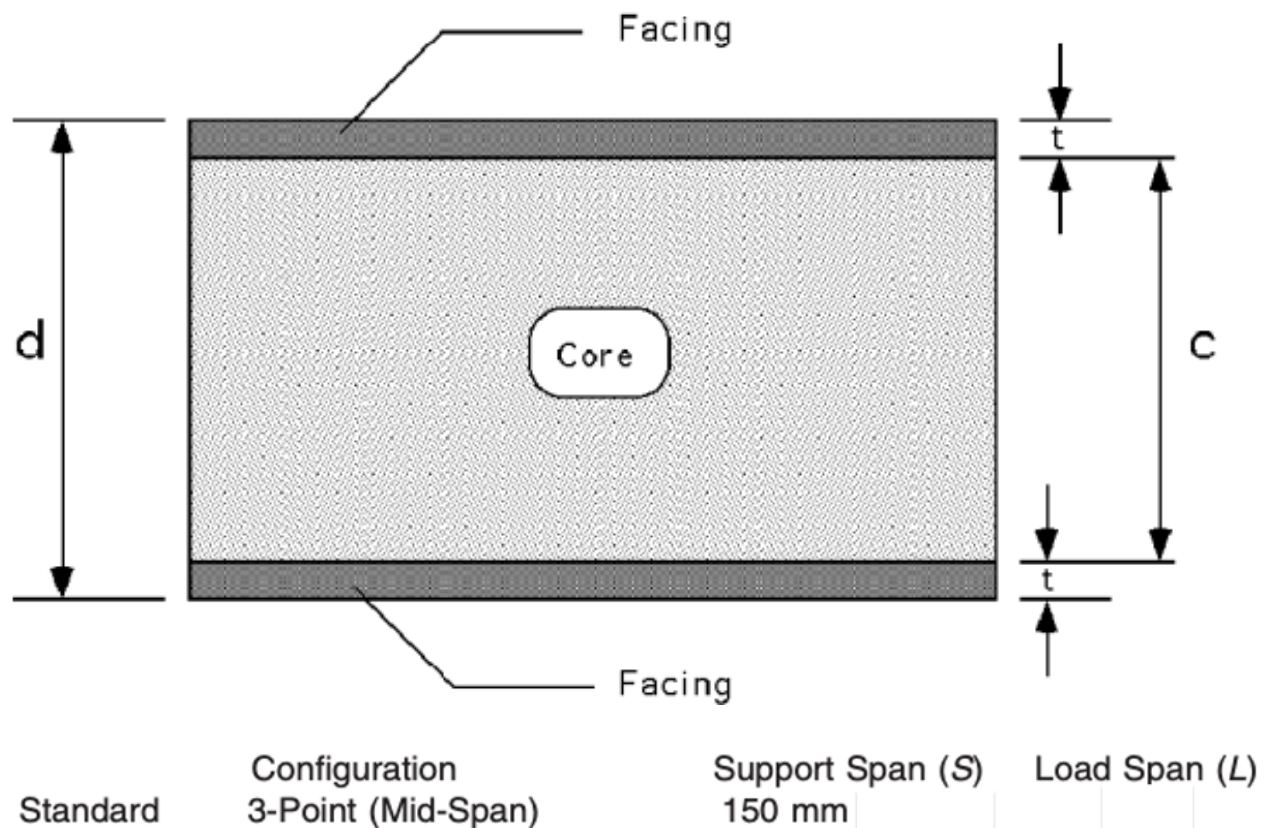


Figura 21. Esquema representativo e dimensões das amostras a serem testadas à flexão.

Através do esquema anteriormente apresentado, e com recurso aos *softwares* Shapr3D e PrusaSlicer procedeu-se à modelação e configuração das peças a serem impressas, respetivamente, como é possível ver na Figura 22 e Figura 23, o resultado da modelação já no PrusaSlicer, assim como a configuração interna delas.

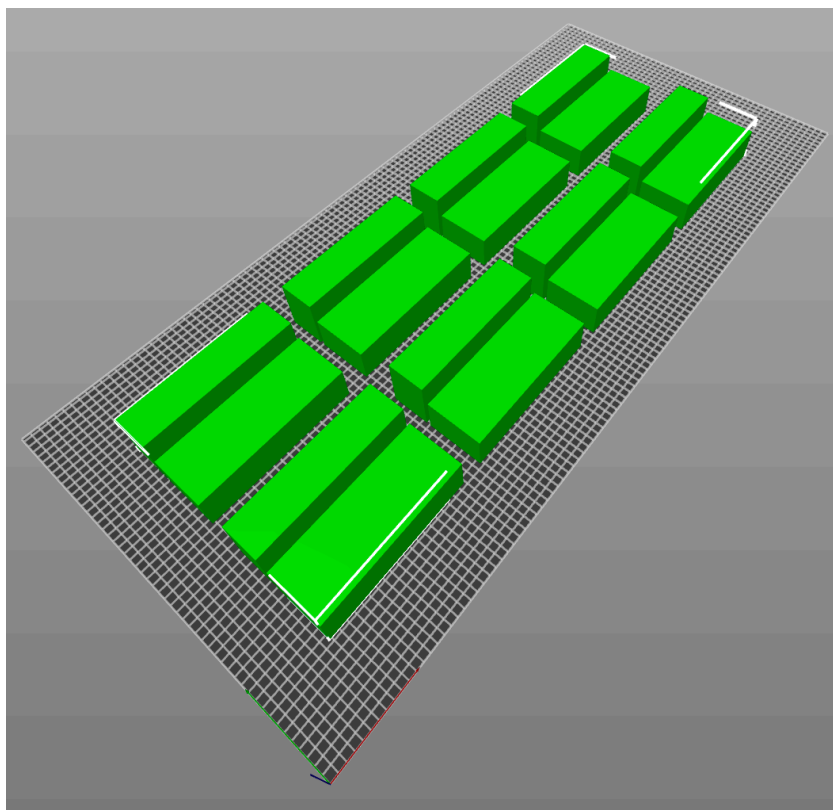


Figura 22. Modelação das peças alvo de teste à flexão.

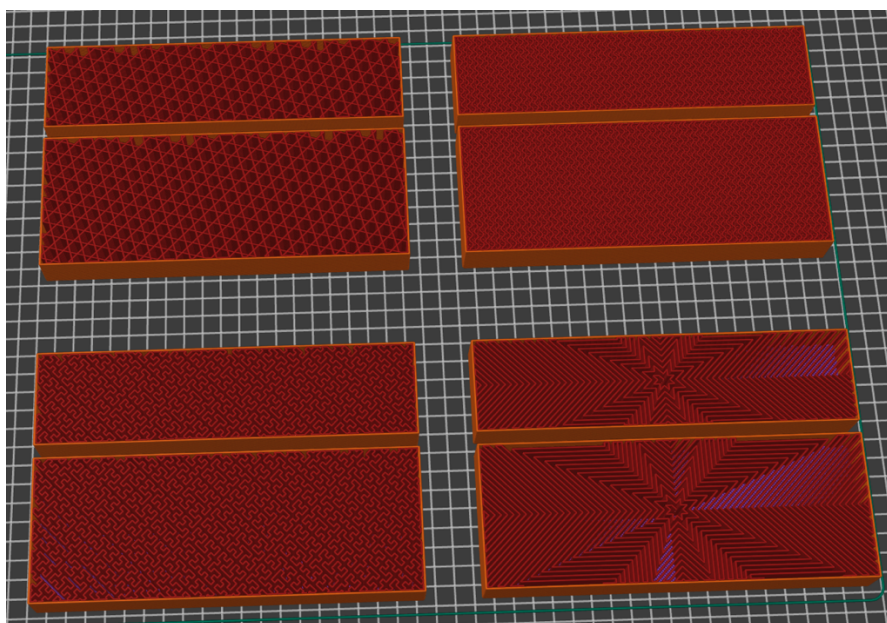


Figura 23. Pormenor da geometria interna das peças alvo de teste à flexão.

Todas as amostras foram impressas com igual percentagem de *infill* (25%), devendo-se esta opção a dois principais motivos: à igualdade de critérios para todas as amostras aquando da realização dos testes; devido às dimensões consideráveis das peças, a necessidade de um *infill* relativamente baixo de forma a reduzir o tempo de impressão. Uma vez realizada a análise preliminar a todas as geometrias, serão definidas as que apresentam melhores resultados e testadas com diferentes percentagens de *infill*.

Na Figura 24 e Figura 25 é possível ver o resultado das impressões, bem como uma amostra pormenorizada de uma das peças alvo de teste, respetivamente.

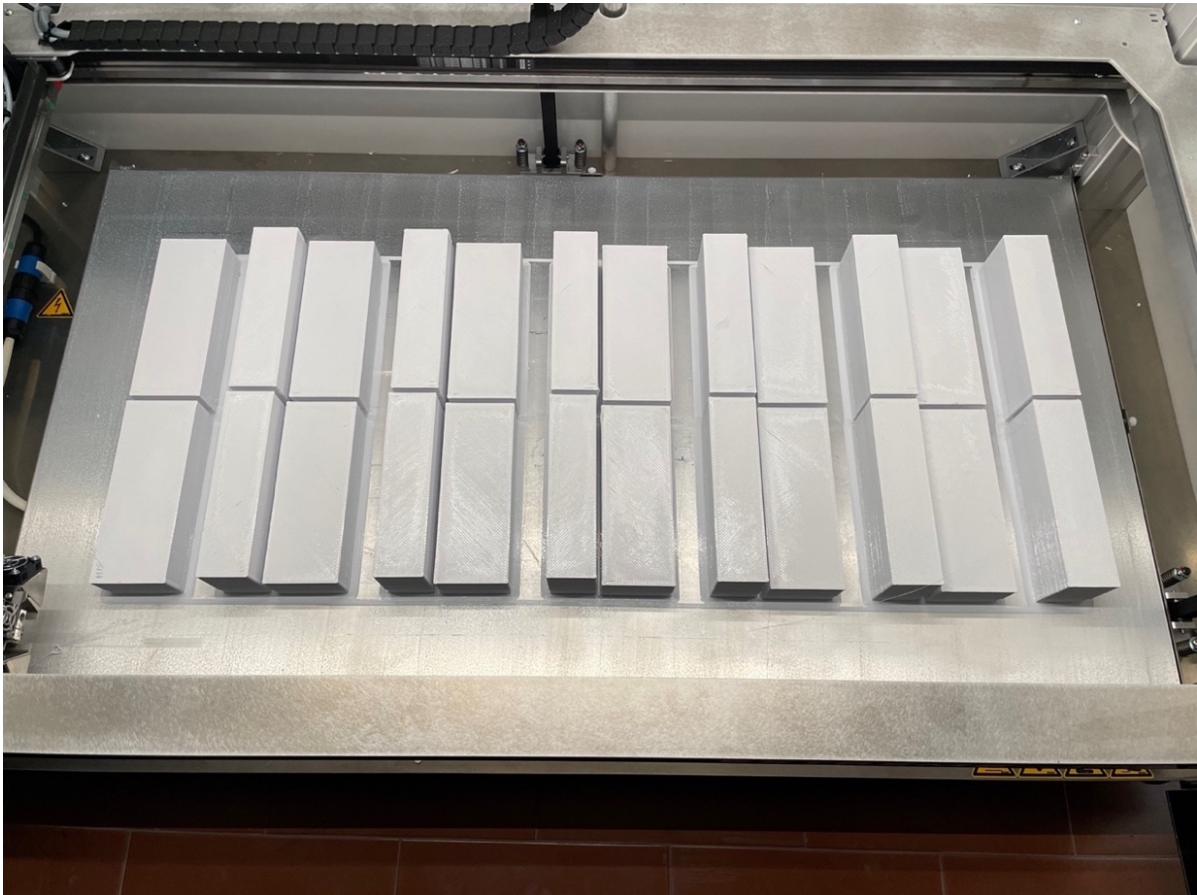


Figura 24. Resultado da impressão das peças a serem testadas à flexão.



Figura 25. Amostra de peça prestes a ser ensaiada à flexão.

O equipamento utilizado para realizar os ensaios à flexão já foi previamente apresentado, pelo que de seguida, na Figura 26, serão mostrados os diferentes tipos de suporte utilizados para a realização deste tipo de ensaios.



Figura 26. Equipamento para a realização dos ensaios de flexão.

A disposição das peças surge de acordo com a norma ASTM C393, sendo que os testes foram realizados segundo o mesmo esquema (*3 Point Bending Test*) como se pode verificar na Figura 27 e na Figura 28.

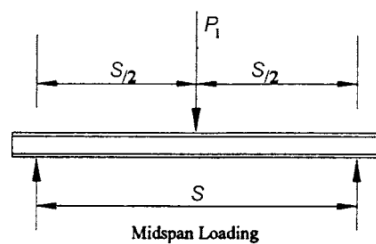


Figura 27. Esquema representativo dos ensaios a realizar.

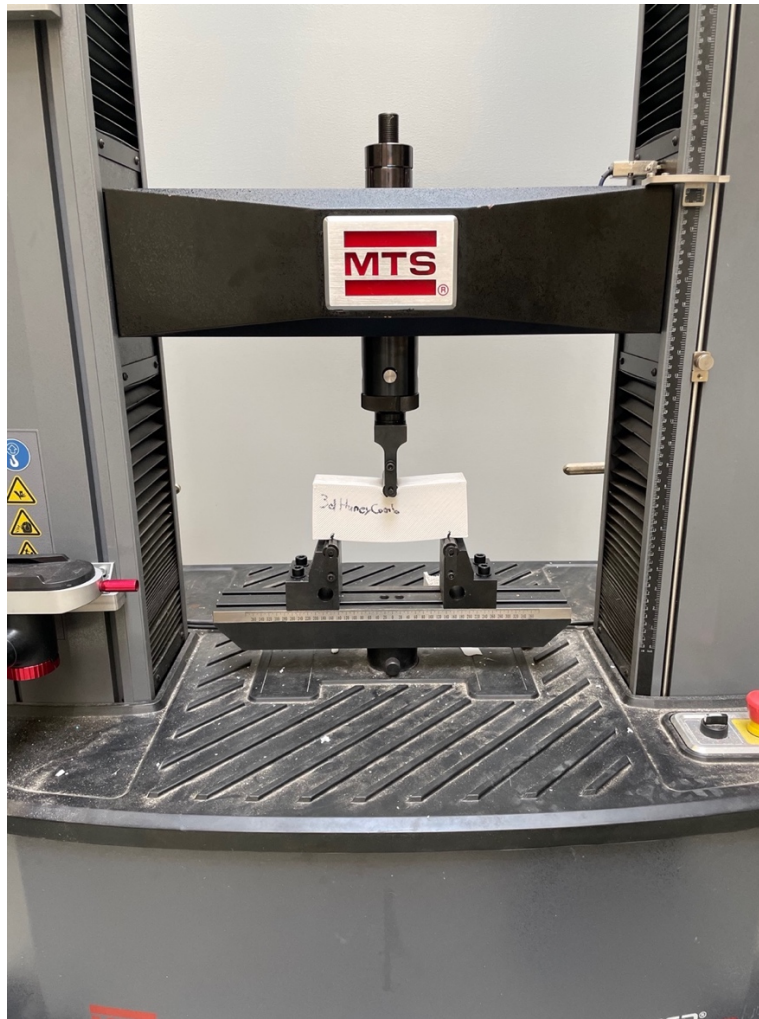


Figura 28. Ensaio de flexão.

As peças foram impressas em duplicado, de forma que todas fossem testadas duas vezes devido à orientação de impressão, pois determinadas geometrias internas teoricamente iriam apresentar discrepância de resultados conforme a sua orientação de impressão, como é possível verificar na Figura 29.



Figura 29. Pormenor da orientação de impressão, na geometria Stars com 50% de *infill*.

Nota para o erro da não colocação de uma peça nos apoios que evitasse o esmagamento sofrido em todas as peças, à medida que o ensaio decorria, como mostra a Figura 30. Como seria de esperar, à medida que a percentagem de *infill* aumenta este fenómeno é menos visível.



Figura 30. Amostras pós-teste.

Na Figura 31, devido à forma como ocorreu o ensaio, é possível verificar os dois tipos distintos de geometrias internas presentes na estrutura das peças testadas.

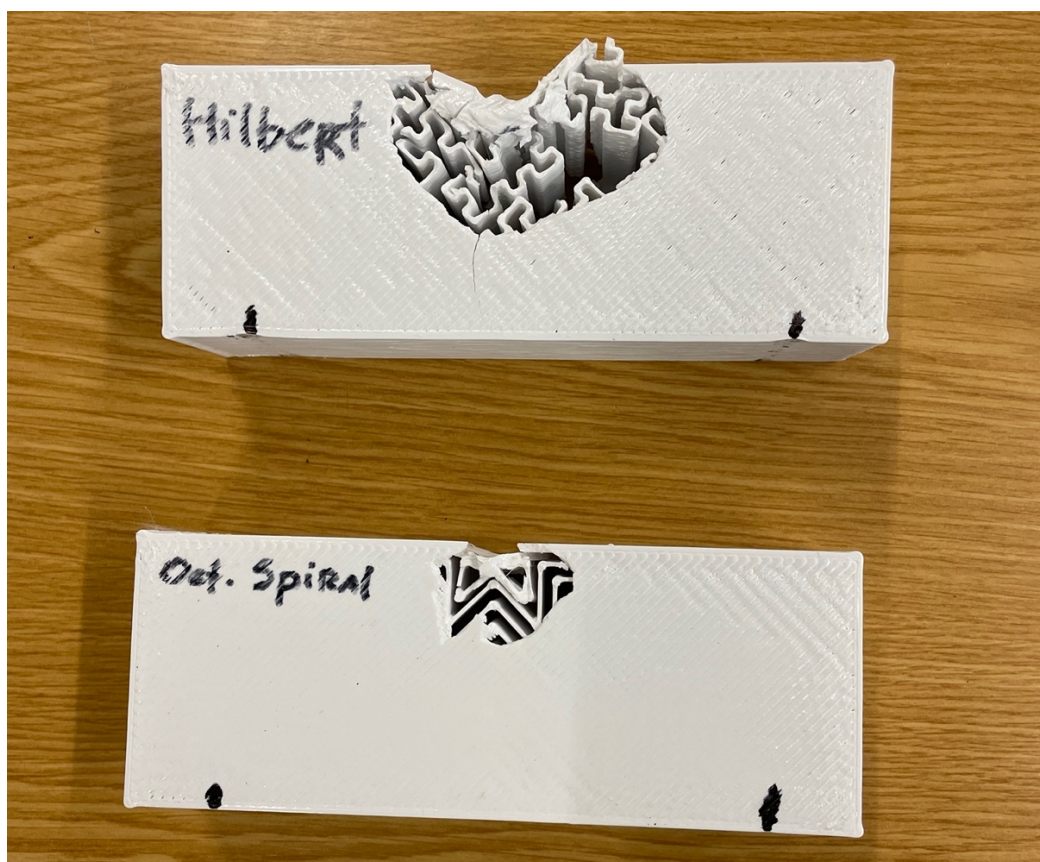


Figura 31. Pormenor das geometrias internas.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos após a realização dos testes descritos no capítulo anterior.

4.1. ENSAIOS TÉRMICOS

Todas as doze geometrias divididas pelos dois painéis impressos, foram submetidas ao mesmo teste, com igual percentagem de *infill*: 25%. A resistência térmica (R) de um material corresponde à dificuldade de transmissão de calor através do mesmo e é determinada pelo quociente entre a espessura do material (E) e a condutibilidade térmica dele (λ), como podemos ver na Equação 1.

$$R \left(\frac{m^2 \times K}{W} \right) = \frac{E (m)}{\lambda \left(\frac{W}{m \times K} \right)}$$

Equação 1. Resistência Térmica.

Portanto, quanto menor for a condutibilidade térmica e maior for a espessura do material, mais eficaz será o isolamento térmico – logo quanto maior o valor de R, melhor será o isolamento oferecido.

Na Tabela 4 encontram-se sucintamente resumidos os resultados obtidos, após os ensaios térmicos realizados, da resistência térmica apresentada pelas diferentes geometrias testadas.

Tabela 4. Resultados dos ensaios térmicos.

<i>Infill. 25%</i>		
Geometria	U (W/(m ² /K))	R ((m ² /K)/W)
3D Honeycomb	0,722	1,216
Concentric	0,520	1,752
Cubic	0,862	0,990
Grid	0,743	1,176
Gyroid	0,658	1,350
Hilbert Curve	0,654	1,360
Honeycomb	0,778	1,115
Line	0,736	1,188
Octagram Spiral	0,894	0,948
Retilinear	0,729	1,202
Stars	0,703	1,252
Triangles	0,737	1,187

De forma a que os dados da Tabela 4 sejam mais facilmente interpretados, são apresentados sob a forma de gráfico na Figura 32.

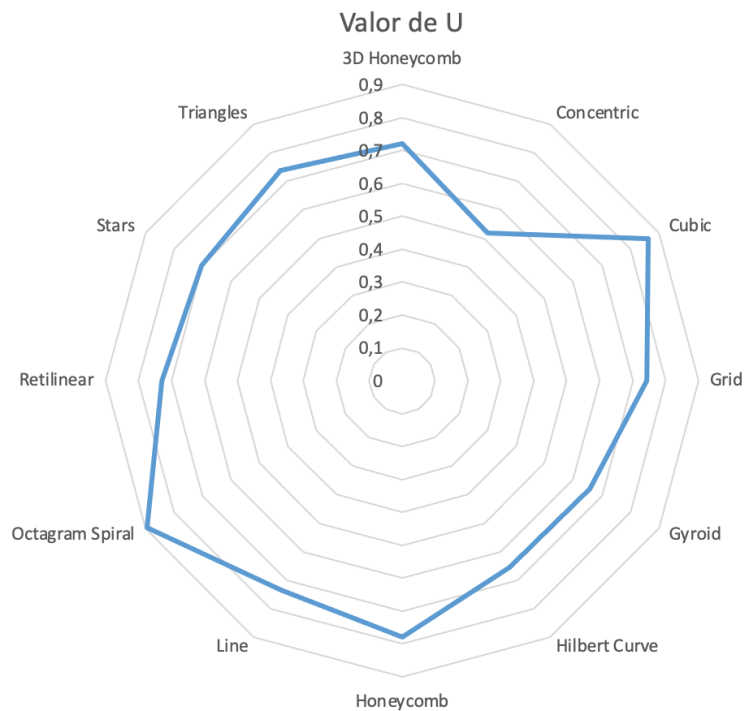


Figura 32. Representação gráfica do coeficiente de transmissão térmica das amostras analisadas.

Assim, facilmente se verifica que as três melhores geometrias são: Concentric, Hilbert Curve e Gyroid, respetivamente. Numa fase posterior, estas 3 geometrias internas serão novamente testadas, mas desta vez com diferentes percentagens de *infill* cada uma, de forma a aferir a influência que esta percentagem apresenta no seu desempenho térmico.

4.2. ENSAIOS MECÂNICOS

4.2.1. ENSAIOS À TRAÇÃO

Durante a realização dos ensaios mecânicos foi possível perceber a diferença da resistência oferecida por cada geometria, conforme o comportamento da peça, que se traduziu nos resultados obtidos, sucintamente, expressos na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da primeira fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).

<i>Infill: 50%</i>						
	3D Honeycomb	Concentric	Cubic	Grid	Gyroid	Hilbert Curve
1	2,169	1,640	1,527	1,568	1,949	1,070
2	1,945	1,590	1,438	1,408	1,682	0,975
3	2,087	1,696	1,505	1,347	1,661	1,049
4	2,065	1,703	1,588	1,367	1,668	1,098
5	2,140	1,790	1,390	1,403	1,676	1,169
Média	2,081	1,684	1,490	1,419	1,727	1,072
	Honeycomb	Line	Octagram Spiral	Retilinear	Stars	Triangles
1	1,728	1,488	1,177	1,597	1,232	1,504
2	1,515	1,600	0,956	1,621	1,229	1,303
3	1,830	1,637	1,220	1,623	1,112	1,422
4	1,704	1,574	1,204	1,788	1,130	1,380
5	1,504	1,752	0,993	1,573	1,024	1,330
Média	1,656	1,610	1,110	1,640	1,145	1,388

Na Figura 33 pode-se ver uma representação gráfica dos valores médios obtidos na Tabela 5, de forma a ser possível efetuar uma interpretação mais prática.

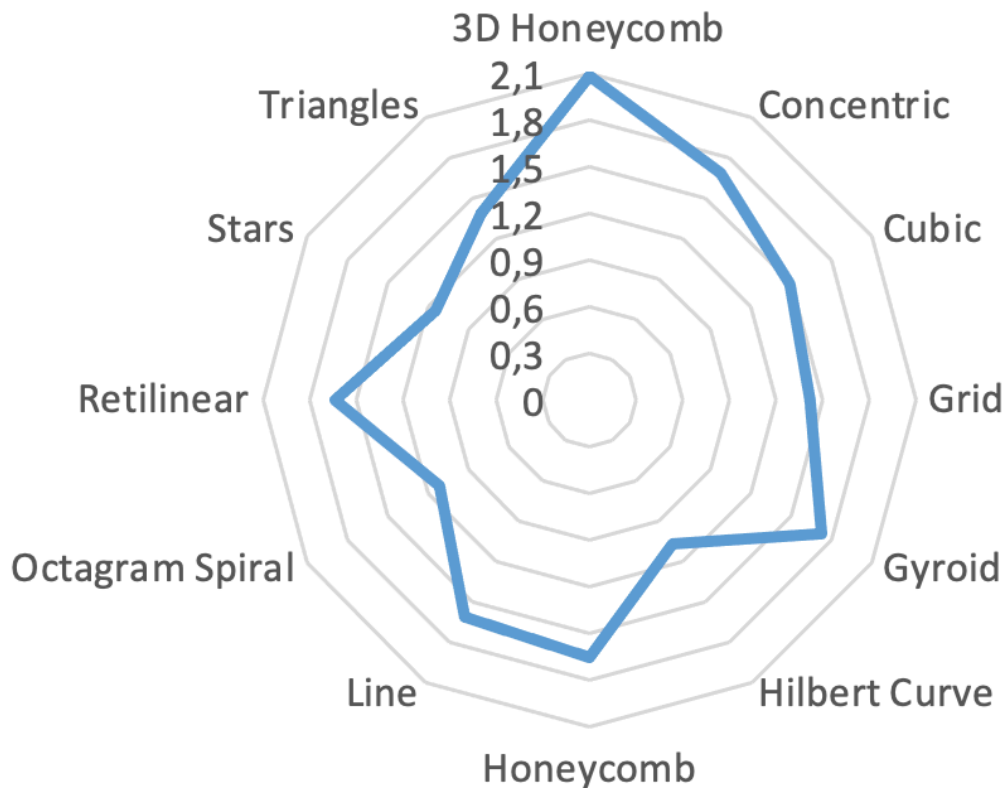


Figura 33. Representação gráfica da resistência à tração das amostras estudadas (kN).

Assim, através de uma rápida análise dos resultados obtidos, é possível concluir que as geometrias internas que apresentaram melhores resultados relativos à resistência à tração foram, respetivamente: 3D Honeycomb, Gyroid e Concentric. A geometria denominada como 3D Honeycomb apresenta-se destacada de todas como aquela que apresentou os melhores resultados, enquanto geometrias como a Honeycomb, Retilinear e Line, respetivamente, apresentaram valores muito próximos, mas inferiores, às duas já referidas como segunda e terceira melhor ao nível do desempenho de tração.

Já no lado oposto, com resultados que comprovam um pior desempenho no que diz respeito ao comportamento relativo à resistência à tração encontram-se as geometrias: Hilbert Curve, Octagram Spiral e Stars, respetivamente, embora todas com valores muito próximos e distantes das que apresentaram melhores resultados.

Desta forma, as geometrias que obtiveram melhores resultados foram testadas com outras percentagens de *infill*, nomeadamente 75% e 99%. A percentagem de *infill* de 99% surge devido ao *software* utilizado apenas permitir a impressão da geometria Retangular com 100% de *infill*, motivo pelo qual ela foi também levada a teste embora não tenha sido reconhecida como uma das melhores geometrias na primeira fase de testes.

Os resultados obtidos nesta segunda fase encontram-se de seguida na Tabela 6 e na Tabela 7 de acordo com a especificação delas.

Tabela 6. Resultados da segunda fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).

<i>Infill: 75%</i>						
	1	2	3	4	5	Média
3D Honeycomb	3,553	3,527	3,179	3,334	3,488	3,412
Concentric	2,030	1,881	2,338	2,013	1,932	2,017
Gyroid	2,493	2,458	2,458	2,283	2,462	2,431

Tabela 7. Resultados da terceira fase dos ensaios mecânicos de tração (kN).

<i>Infill: 99%</i>						
	1	2	3	4	5	Média
3D Honeycomb	3,285	3,396	3,322	3,363	3,512	3,376
Concentric	2,373	2,616	2,441	2,393	*	2,456
Gyroid	2,929	3,024	2,942	2,794	2,977	2,933

* - Devido a uma avaria na impressora, não solucionada dentro do prazo limite, não foi possível a impressão de uma quinta amostra com geometria interna Concentric e percentagem de *infill* 99%, motivo pelo qual a norma não foi integralmente cumprida para esta configuração, encontrando-se um resultado em falta.

Na Figura 34 são apresentados os resultados expressos na Tabela 6 e na Tabela 7 sob a forma de um gráfico, que torna a interpretação e comparação dos valores mais intuitiva.

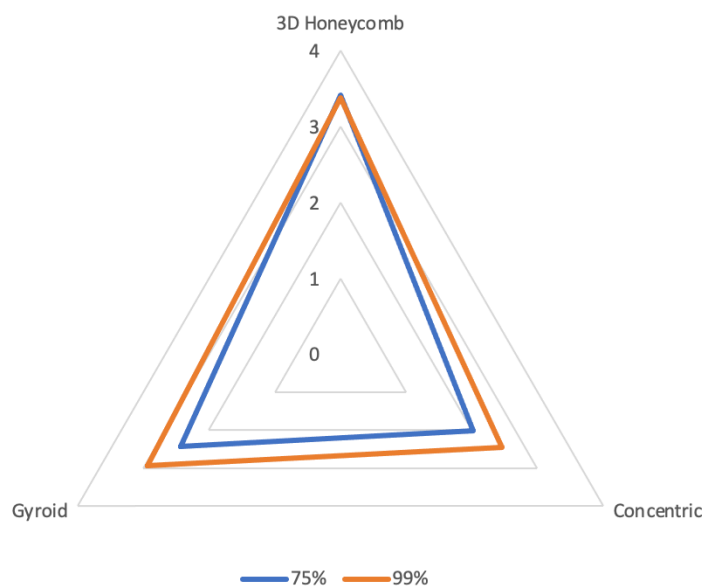


Figura 34. Representação gráfica da resistência à tração das amostras estudadas (kN).

Já na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos nos testes efetuados à geometria com 100% de *infill*.

Tabela 8. Resultado dos ensaios mecânicos de tração com amostra com 100% de *infill* (kN).

<i>Infill</i> 100%	1	2	3	4	5	Média
Retangular	3,203	3,04	2,846	2,897	2,998	2,997

Após a conclusão dos ensaios e por análise dos resultados obtidos pode-se verificar que por norma a percentagem de *infill* faz aumentar a resistência mecânica à tração das peças, independentemente da geometria.

Nota para a situação que acontece com a geometria 3D Honeycomb que, surpreendentemente, apresenta um valor médio de resistência à tração (ligeiramente) inferior quando com um *infill* de 99% relativamente ao valor apresentado pela mesma geometria com uma percentagem de *infill* menor (75%). Este valor é tido como surpreendente pois à exceção deste ensaio, todos os outros confirmam Yadav et al. (2021), que no seu estudo, verificou que o aumento da percentagem de *infill* faz aumentar os índices de resistência mecânica independentemente do padrão de geometria definido.

Contudo, a geometria que mais se destacou foi a 3D Honeycomb, apresentando resultados significativamente superiores com 75% de *infill* mesmo comparando com outras geometrias com percentagens de *infill* superiores (99% e 100%). Pode ainda ser destacado, no caso desta geometria, o

facto de ser registado um maior aumento de desempenho na passagem 50% para 75% do que dos 75% para os 99% de *infill*. Estas conclusões, são facilmente interpretáveis por análise à Figura 35.

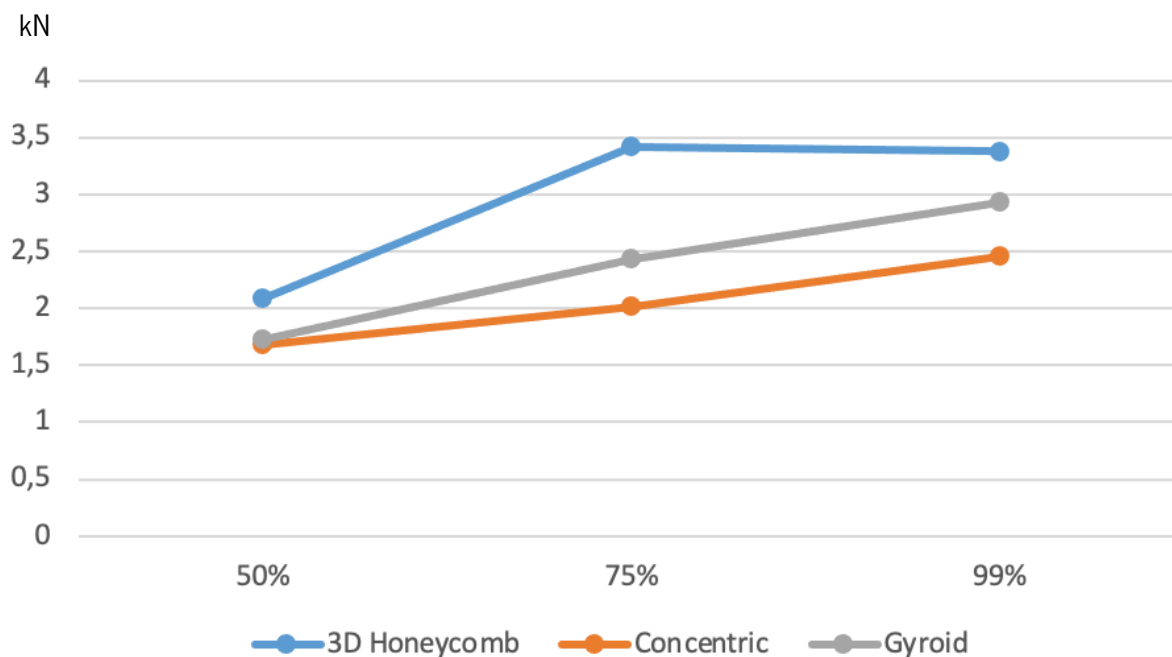


Figura 35. Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios à tração realizados (kN).

4.2.2. ENSAIOS À FLEXÃO

Durante a realização dos ensaios à flexão foi possível perceber a diferença da resistência oferecida por cada geometria, que se traduziu nos resultados obtidos, sucintamente, expressos na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados da primeira fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).

<i>Infill. 25%</i>						
	3D Honeycomb	Concentric	Cubic	Grid	Gyroid	Hilbert Curve
Direção 1	17,280	5,590	15,410	19,840	14,350	6,500
Direção 2	19,850	5,440	20,800	14,900	19,750	4,720
	Honeycomb	Line	Octagram Spiral	Retilinear	Stars	Triangles
Direção 1	22,250	14,010	4,350	18,610	20,380	19,070
Direção 2	19,960	18,730	13,820	13,770	12,050	11,550

A percentagem de *infill* testada para cada amostra foi de 25%, de forma que todas as amostras fossem testadas em iguais condições, permitindo assim distinguir preliminarmente quais as que apresentam melhores resultados.

A questão das direções já foi previamente explicada em 3.2.3.2.2, e agora pode ser comprovada pelos resultados obtidos, pois em determinadas geometrias, é verificada uma diferença considerável de resistência, conforme o sentido de orientação da geometria interna da amostra.

O resultado a ter em conta será aquele que for superior, assumindo que essa orientação de impressão é a melhor para a respetiva geometria. Assim, facilmente se determinam as geometrias Cubic, Honeycomb e Stars como sendo as melhores. Várias geometrias ficaram muito perto dos melhores valores, sendo que as geometrias que mais se destacaram pela negativa foram a Concentric e a Hilbert Curve, curiosamente em ambas as direções.

De seguida, as amostras já referidas foram impressas com percentagens de *infill* de 50% e 75% de forma a aferir a influência que esta percentagem terá no desempenho delas.

Os resultados obtidos nesta fase de ensaios encontram-se na Tabela 10 e Tabela 11 para as percentagens de *infill* testadas.

Tabela 10. Resultado da segunda fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).

<i>Infill: 50%</i>			
	Cubic	Honeycomb	Stars
Direção 1	22,249	22,264	18,430
Direção 2	22,252	22,275	20,782

Tabela 11. Resultado da terceira fase dos ensaios mecânicos de flexão (kN).

<i>Infill: 75%</i>			
	Cubic	Honeycomb	Stars
Direção 1	22,261	22,346	22,254
Direção 2	22,277	22,301	22,266

De uma forma representativa com o objetivo de tornar mais intuitiva a análise geral dos dados, pode-se ver na Figura 36, o gráfico que sintetiza os resultados obtidos nos ensaios à flexão.

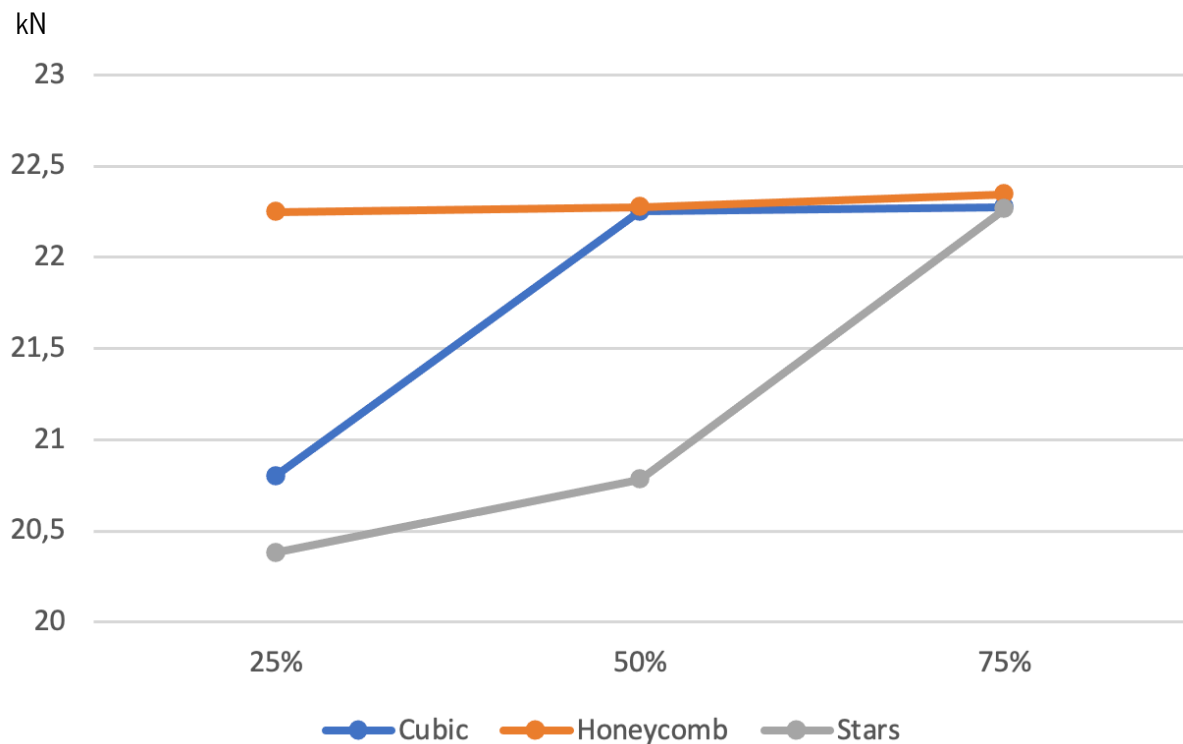


Figura 36. Gráfico síntese dos resultados dos testes à flexão.

À medida que a percentagem de *infill* aumenta reduzem-se os vazios nas amostras, motivo pelo qual seria de esperar uma convergência dos resultados. Mesmo assim, é possível verificar que com 50% de *infill* as amostras com a geometria interna Stars apresentam piores resultados, sendo que se aproximam quando esta percentagem aumenta, tomando todas as geometrias valores na casa dos 22kN.

Por análise do gráfico mostrado na Figura 36, todas as geometrias convergiram para um valor muito próximo (na ordem dos 22,2 kN) com a percentagem de 75% de *infill*. A geometria designada por Honeycomb desde o primeiro ensaio, com *infill* inferior, que registou valores próximos do seu máximo. Já no que diz respeito à geometria interna Cubic, foi notória a melhoria de desempenho na passagem de 25% para 50% de *infill* onde esta atingiu um valor próximo do obtido com 75%. Por fim, a geometria Stars foi a que revelou um desempenho crescente mais constante acompanhando o aumento da percentagem de *infill*, aproximando-se das restantes, mas sendo sempre inferior.

Desta análise de resultados, pode-se concluir que a melhor geometria relativamente ao seu comportamento à flexão é a Honeycomb pois para além dos seus valores serem superiores, consegue

atingir esses valores com menores percentagens de *infill* (o que se pode traduzir em menores gastos materiais), comparativamente com as outras geometrias.

De registar ainda o facto de apenas terem quebrado as amostras com geometria interna Stars a 50% de *infill*, algo que não se verificou na primeira fase de testes (com 25% de *infill*), onde várias geometrias cederam. As geometrias com 75% de *infill* mantiveram-se todas praticamente intactas, como se pode verificar, através das amostras com geometria Honeycomb, na Figura 37.



Figura 37. Exemplos com 75% de *infill* após teste à flexão.

4.3. SÍNTESE

Após a conclusão da primeira fase de testes, efetuada a todas as geometrias com iguais percentagens de *infill* referente a cada um dos três tipos de teste realizados, foi possível selecionar para cada um qual as três geometrias que apresentaram melhores resultados de forma a estudá-las mais profundamente.

Em forma de síntese serão de seguida, na Tabela 12, apresentados os melhores resultados obtidos em cada teste.

Tabela 12. Síntese dos melhores resultados obtidos em cada tipo de ensaio realizado.

Ensaio	Geometria	Infill	Resultado	Unidades
Térmico	Concentric	25%	1,752	$(m^2/k)/W$
Mecânico - Tração	Honeycomb	75%	3,412	kN
Mecânico - Flexão	3D Honeycomb	99%	22,346	kN

Após a realização e análise dos resultados obtidos nos testes mecânicos facilmente se percebe, que tal como indica Fadhil Alani et al. (2017), por norma são escolhidas menores percentagens de *infill* com o objetivo de reduzir o tempo de impressão ou reduzir os gastos de material, ou ambos. Já quando o objetivo passa pela obtenção de boas propriedades mecânicas é recomendado o aumento desta percentagem para valores mais próximas dos 100%.

Uma vez realizados os ensaios e a respetiva análise aos valores obtidos, fica apenas a faltar analisar o custo associado a cada geometria. Este parâmetro em nada interfere com os desempenhos das geometrias, contudo, tem um peso considerável na avaliação final delas, pois afeta diretamente a decisão no momento da escolha da geometria a utilizar. É então efetuada uma análise relativamente a este aspecto, de forma a poder concluir, qual a melhor geometria interna, e como esta afeta o custo associado a cada amostra.

Os valores associados aos custos de impressão de cada geometria foram obtidos através de uma estimativa efetuada pelo *software* PrusaSlicer, e encontram-se apresentados na Tabela 13. Para obter valores fidedignos, foi simulada uma amostra no *software* com iguais dimensões e iguais percentagens de *infill*, variando apenas a geometria interna associada. A amostra teve as dimensões de (500x150x500) mm (comprimento x espessura x altura) e uma percentagem de *infill* de 25%.

Tabela 13. Custos associados a cada geometria para um painel com 500x150x500 mm (comprimento x espessura x altura) e com 25% de infill.

Geometria	Custo (€)
3D Honeycomb	432,44
Concentric	320,19
Cubic	321,84
Grid	316,10
Gyroid	308,99
Hilbert Curve	325,70
Honeycomb	392,45
Line	323,38
Octagram Spiral	319,39
Retilinear	324,89
Stars	320,90
Triangles	323,62

Como já havia sido abordado, de forma a efetuar uma análise final tendo em conta todos os três parâmetros analisados – Desempenho Térmico, Desempenho Mecânico e Custos – foi utilizado o *software* Mixtri2.0, para de uma forma sucinta se fazer uma análise global às geometrias estudadas.

Assim, recorrendo-se ao referido *software*, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 38, que teve em conta os três parâmetros em análise: Desempenho Térmico, Custos e Desempenho Mecânico. Embora discutível e sem uma base de suporte sólida, decidiu-se atribuir um peso de 50% ao Desempenho Térmico, um peso de 30% aos Custos e um peso de 20% ao Desempenho Mecânico. Decidiu-se, deste modo, privilegiar o desempenho térmico tendo em conta a finalidade a que os módulos de fachada se destinam. Este é, certamente, um tema a explorar em futuros trabalhos.

Os valores utilizados neste *software* foram todos apresentados anteriormente neste documento: Desempenho Térmico - Tabela 4; Desempenho Mecânico – Tabela 7 e Tabela 11; Custo - Tabela 13.

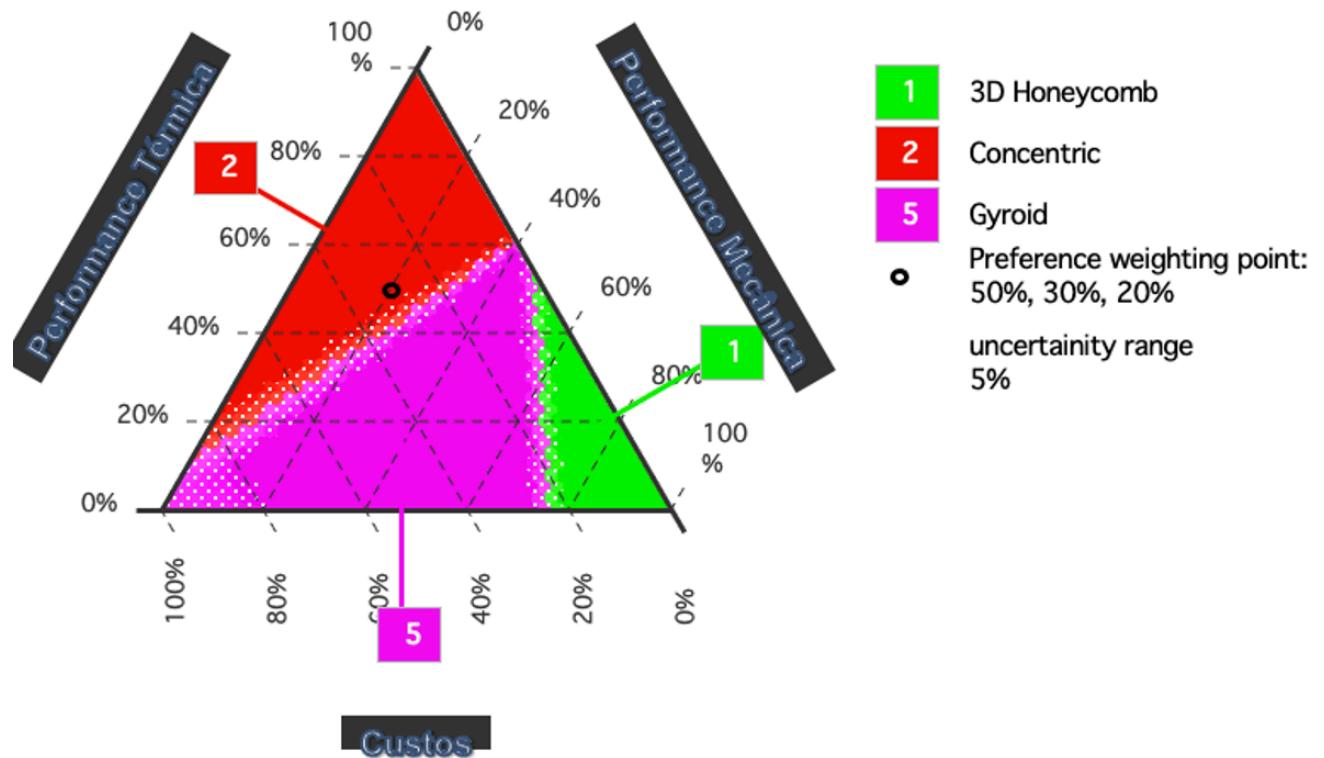


Figura 38. Diagrama triangular obtido no Mixtri2.0.

Por análise ao gráfico da Figura 38, compreende-se que as três melhores geometrias são: 3D Honeycomb, Concentric e Gyroid. Assim, com base no diagrama, retiram-se as seguintes conclusões acerca delas:

- A geometria 3D Honeycomb revela-se como a melhor ao nível do desempenho mecânico, sendo, contudo, a que revela pior relação com o custo;
- Já a geometria Concentric apresenta o melhor desempenho térmico e o pior desempenho mecânico, revelando a segunda melhor relação com o custo;
- Por sua vez, a geometria Gyroid tem o menor custo, contudo situa-se no meio das outras duas geometrias relativamente a ambas os desempenhos analisados.

O ponto designado pelo *software* como perfeito encontra-se situado na “área” da geometria Concentric, motivo pelo qual se pode assumir que esta foi a geometria com melhores resultados globais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Com o aumento generalizado da população, e de forma a satisfazer as suas necessidades, novos edifícios terão de ser construídos e outros atualizados para garantir as condições ideais de utilização. Desta forma, e tendo em conta a poluição causada por resíduos plásticos, procurou-se obter uma solução que sirva aos dois propósitos abordados. A técnica da manufatura aditiva, como já seria esperado, apresenta um enorme potencial, e embora nesta dissertação, os resultados práticos sejam de “pequena dimensão”, já é possível compreender a sua utilidade para influenciar as questões abordadas relativas à qualidade das soluções tanto a nível ambiental como de conforto dos utilizadores dos edifícios.

Assim, a presente dissertação mostrou os resultados obtidos termicamente e mecanicamente de várias amostras impressas em PET-G com diferentes características, permitindo compreender a influência delas no comportamento das amostras.

Como já seria expectável, independentemente da geometria definida, quanto maior for a percentagem de *infill*, melhores resultados serão obtidos, contudo mais material será gasto o que leva a um maior custo. É por isso importante encontrar um equilíbrio entre todos os parâmetros de forma a atingir uma solução adequada para cada caso em questão.

Pelos valores obtidos, tanto nos ensaios mecânicos como nos ensaios térmicos, cada geometria apresenta melhores resultados num determinado contexto, o que já seria expectável dado os padrões das diferentes geometrias e percentagens de *infill* de cada uma.

Assim, cabe ao responsável, efetuar uma escolha criteriosa tanto da geometria como da percentagem de *infill*, tendo para isto em conta todos os restantes parâmetros associados, de forma a conseguir a solução ideal para o problema em questão. Sendo a imensa variedade de opções um fator favorável para realizar esta escolha.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

No contexto dos estudos realizados apresentam-se algumas sugestões com vista ao desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Efetuar a impressão e realização dos testes térmicos com diferentes percentagens de *infill* de forma a poder realizar uma análise mais concreta da influência deste parâmetro no desempenho térmicos dos painéis;
- Testar mais pormenorizadamente as percentagens de *infill* que permitem que cada geometria atinja o seu desempenho máximo de acordo com o parâmetro a analisar;
- Perceber quais os custos precisos, bem como os gastos de material e de tempo, associados à impressão de cada geometria, para um caso real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaszadeh, S., Zagreus, L., Lehrer, D., Zagreus, L., & Huizenga, C. (2006). *UC Berkeley Indoor Environmental Quality (IEQ) Title Occupant satisfaction with indoor environmental quality in green buildings Publication Date Occupant Satisfaction with Indoor Environmental Quality in Green Buildings*.
- Agarwal, S., & Gupta, R. K. (2017). Plastics in Buildings and Construction. In *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition* (pp. 635–649).
- Alabi, O. A., Ologbonjaye, K., Awosolu, O., Alabi, O. A., Ologbonjaye, K. I., & Alalade, O. E. (2019). Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *J Toxicol Risk Assess*, 5, 21.
- Aloyaydi, B. A., Sivasankaran, S., & Ammar, H. R. (2019). Influence of infill density on microstructure and flexural behavior of 3D printed PLA thermoplastic parts processed by fusion deposition modeling. *AIMS Materials Science*, 6(6), 1033–1048.
- Alvarez, K. L., Lagos, R. F., & Aizpun, M. (2016). *Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts Investigando la influencia del porcentaje de relleno en las propiedades mecánicas, de elementos impresos con ABS por el método de modelado por deposición fundida*. 36(3), 110–116.
- Amorim, C. A., & Cardoso, A. (2021). European Climate Law-real changes or postponed future?
- Barreira, E., & de Freitas, V. P. (2014). External thermal insulation composite systems: Critical parameters for surface hygrothermal behaviour. *Advances in Materials Science and Engineering*
- Bergonzi, L., Vettori, M., Stefanini, L., & D'Alcamo, L. (2021). Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1038(1), 012071.
- Chen, Z., & Turng, L.-S. (2005). REVIEW A Review of Current Developments in Process and Quality Control for Injection Molding Injection Molding Process and Quality Control that the quality sensor and the process and quality model are the two most important areas for further advancement in injection molding control.
- Chi-Fung Li, V., Kuang, X., Hamel, C. M., Roach, D., Deng, Y., & Jerry Qi, H. (2019). *Cellulose nanocrystals support material for 3D printing complexly shaped structures via multi-materials-multi-methods printing*.

- Clements-Croome, D. J., Li, B., Clements-Croome, D., & Baizhan, L. (2000). *Productivity and indoor environment Program*
- Cohen, J. E. (2002). *World Population in 2050: Assessing the Projections*.
- Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., & Pham, D. (2017). Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8, 263–282.
- Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264.
- Dupaix, R. B., & Boyce, M. C. (2005). Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*, 46(13), 4827–4838.
- Durgashyam, K., Indra Reddy, M., Balakrishna, A., & Satyanarayana, K. (2019). Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. *Materials Today: Proceedings*, 2052–2059.
- Eckert, E., & Kovalevska, O. (2021). *Risk and Financial Management Sustainability in the European Union: Analyzing the Discourse of the European Green Deal*.
- Elmrabet, N., & Siegkas, P. (2020). Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. *Polymer Testing*, 90.
- Fadhil Alani, T., Basil Ali, H., Abbas, D., Mohammad Othman, D., & Author, C. (2017). Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process Pick and place process analysis using 5DOF articulated robot View project Effect of Infill Density on Mechanical Properties of PLA in 3D Printing View project Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process. *Int. Journal of Engineering Research And Application Wwww.Ijera.Com*, 7, 16–19.
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192.
- Franchetti, M., & Kress, C. (2017). An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9–12), 2573–2579.
- Fu, Y., Downey, A., Yuan, L., Pratt, A., & Balogun, Y. (2021a). In situ monitoring for fused filament fabrication process: A review. In *Additive Manufacturing* (Vol. 38).

- Geng, Y., Ji, W., Wang, Z., Lin, B., & Zhu, Y. (2019). A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction. *Energy and Buildings, 183*, 500–514.
- Gieryn, T. F. (2014). *What buildings do*.
- Goodship, V. (2007). Plastic recycling. In *Science Progress* (Vol. 90, Issue 4, pp. 245–268).
- Gou, Z., Prasad, D., & Siu-Yu Lau, S. (2013). Are green buildings more satisfactory and comfortable? *Habitat International, 39*, 156–161.
- Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A., & Kalamees, T. (2020). Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB. *Energy, 194*.
- Hilal Amir, A., & Halil Zafer Alibaba, A. (2017). Comparison between Heat Conductivity of EPS (Expanded Polystyrene) and XPS (Extruded Polystyrene). In *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)* (Vol. 4).
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). *Manufacturing and Materials Processing Support Structures for Additive Manufacturing: A Review*.
- Kamau-Devers, K., Yanez, V. R., Medina Peralta, V. W., & Miller, S. A. (2021). Using internal micro-scale architectures from additive manufacturing to increase material efficiency. *Journal of Cleaner Production, 291*.
- Khosravani, M. R., & Nasiri, S. (2020). Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications. In *Journal of Intelligent Manufacturing* (Vol. 31, Issue 4, pp. 847–864).
- Khosravani, M. R., Zolfagharian, A., Jennings, M., & Reinicke, T. (2020). Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions. *Polymer Testing, 91*.
- Kibert, C. J. (2004). *Green Buildings: An Overview of Progress*.
- Kougiass, I., Taylor, N., Kakoulaki, G., & Jäger-Waldau, A. (2021). The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*.
- Lebedev, S. M., Gefle, O. S., Amitov, E. T., Berchuk, D. Y., & Zhuravlev, D. v. (2017). Poly(lactic acid)-based polymer composites with high electric and thermal conductivity and their characterization. *Polymer Testing, 58*, 241–248.
- Li, W. C., Tse, H. F., & Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of the Total Environment, 566–567*, 333–349.
- Mallick, F. H. (1996). Thermal comfort and building design in the tropical climates. *Energy and Buildings, 23*(3), 161–167.
- Md Akil, H., Lanceros-Mendez, S., Hassan, A., Vicente Lopes Silva, J., Shi, X., Qin, H., Cheng, Y., Jiang, X., & Wang, X. (2020). Printability of a Cellulose Derivative for Extrusion-Based 3D Printing: The

- Application on a Biodegradable Support Material. *Biodegradable Support Material. Front. Mater*, 7, 86.
- Mirrahimi, S., Mohamed, M. F., Haw, L. C., Ibrahim, N. L. N., Yusoff, W. F. M., & Aflaki, A. (2016). The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1508–1519.
- Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*, 100.
- Monteiro Da Silva, S., & Guedes De Almeida, M. (2010). *Thermal and Acoustic Comfort in Buildings*.
- Moretti, M., Rossi, A., & Senin, N. (2021). In-process simulation of the extrusion to support optimisation and real-time monitoring in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 38.
- Nagy, Á., & Kuti, R. (2016). The Environmental Impact of Plastic Waste Incineration. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 15(3), 231–237.
- Nair, G., Gustavsson, L., & Mahapatra, K. (2010). Owners perception on the adoption of building envelope energy efficiency measures in Swedish detached houses. *Applied Energy*, 87(7), 2411–2419.
- Nasir, M., & Ahsan, M. U. (2020). *Examining the Causes of Plastic Bags Usages and Public Perception about its Effects on the Natural Environment*.
- Obebe SB, & Adamu AA. (2020). Plastic Pollution: Causes, Effects and Preventions. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4.
- Oktavia, V., & Kusuma, N. R. (2020). Plastic material as building facade. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 452(1).
- Olubunmi, O. A., Xia, P. B., & Skitmore, M. (2016). Green building incentives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1611–1621.
- Özen, A., Auhl, D., Völlmecke, C., Kiendl, J., & Abali, B. E. (2021). Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (Fdm) 3d-printed petg. *Materials*, 14(10).
- Pandzic, A., Hodzic, D., & Milovanovic, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 30(1), 545–554.
- Pihl, E., Alfredsson, E., Bengtsson, M., Bowen, K. J., Cástan Broto, V., Tien Chou, K., Cleugh, H., Ebi, K., Edwards, C. M., Fisher, E., Friedlingstein, P., Godoy-Faúndez, A., Gupta, M., Harrington, A. R., Hayes, K., Hayward, B. M., Hebden, S. R., Hickmann, T., Hugelius, G., ... Zelinka, M. D. (2020).
- Pilipenko, A., Bobrova, E., & Zhukov, A. (2019). *Optimization of plastic foam composition for insulation systems*.

- Proshad, R., Kormoker, T., Islam, S., Haque, M. A., Rahman, M. M., & Mithu, R. (2018). International Journal of Health Toxic effects of plastic on human health and environment : A consequences of health risk assessment in Bangladesh. *International Journal of Health*, 6(1), 1–5.
- Qureshi, M. S., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., Minkkinen, H., Pohjakallio, M., & Laine-Ylijoki, J. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152.
- Ribeiro, N. A. (2013). *Engenharia Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior Condições de aplicação e utilização na reabilitação térmica dos edifícios Engenharia Civil*.
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258.
- Rodrigues, A., & Almeida, M. (2012). *2505-Reabilitação energética de edifícios_Ana Carlota Rocha_MA*.
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631.
- Saraiva, T. S., de Almeida, M., & Bragança, L. (2019). Adaptation of the SBTool for sustainability assessment of high school buildings in Portugal-SAHSBPT. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(13).
- Sarakinioti, M. V., Turrin, M., Teeling, M., de Ruiter, P., van Erk, M., Tenpierik, M., Konstantinou, T., Knaack, U., Pronk, A., Teuffel, P., van Lier, A., Vorstermans, R., Dolkemade, E., de Klijn, M., Loonen, R., Hensen, J., & Vlasblom, D. (2018). *Spong3d 3D printed facade system enabling movable fluid heat storage*.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2013). Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. *Energy and Buildings*, 60, 410–419.
- Sekar, V., Fouladi, M. H., Namasivayam, S. N., & Sivanesan, S. (2019). Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties. In *Journal of Engineering (United Kingdom)* (Vol. 2019). Hindawi Limited.
- Shent, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1999). A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 25(2), 85–109.
- Siddi, M. (2020). *Assessing its Current State and Future Implementation 114 the European Green Deal*.
- Silva, P. (2006). *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*.

- Silvestre, J. D., Castelo, A. M. P., Silva, J. J. B. C., Brito, J. M. C. L., & Pinheiro, M. D. (2019). Retrofitting a building's envelope: Sustainability performance of ETICS with ICB or EPS. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(7).
- Singh, C. S. (2018). *Civil Eng Res J Green Construction: Analysis on Green and Sustainable Building Techniques*. 4.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials and Design*, *31*(1), 287–295.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H., & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values*, *31*(1), 33–51.
- Srinivasan, R., Ruban, W., Deepanraj, A., Bhuvanesh, R., & Bhuvanesh, T. (2020). Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 1838–1842.
- Subbarao, C. v, Reddy, Y. S., & Reddy, I. (2021). *Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material You may also like Electroless Plating of NiP and Cu on Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified for 3D Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material*.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & van den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 201–215.
- Thiounn, T., Smith, R. C., & Rhett Smith, C. C. (2020). *Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste*.
- Thompson, R. C., Moore, C., Andrady, A., Gregory, M., Takada, H., & Weisberg, S. (2005). *New Directions in Plastic Debris*.
- Valinejadshoubi, M., Valinejadshoubi, M., & Valinejad, M. (2013). Investigating the Application of Plastic Bottle as a Sustainable Material in the Building Construction Structural Health Monitoring View project Construction Management View project Investigating the Application of Plastic Bottle as a Sustainable Material in the Building Construction Smart Facades for a Sustainable Future: A Parametric Study on Daylight and Discomfort Glare based on a Hexagonal Responsive Skin View project. In *International Journal of Science, Engineering and Technology Research* (Vol. 2, Issue 1).
- Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. S. (2016). Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. *Procedia Environmental Sciences*, *35*, 701–708.
- Visscher, H., Sartori, I., & Dascalaki, E. (2016). Towards an energy efficient European housing stock: Monitoring, mapping and modelling retrofitting processes: Special issue of Energy and Buildings. *Energy and Buildings*, *132*, 1–3.

- Vivero, L., Barriocanal, C., Álvarez, R., & Díez, M. A. (2005). Effects of plastic wastes on coal pyrolysis behaviour and the structure of semicokes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74(1–2), 327–336.
- Vo, C. v, Bunge, F., Duffy, J., & Hood, L. (2011a). Advances in Thermal Insulation of Extruded Polystyrene Foams. In *Cellular Polymers* (Vol. 30, Issue 3).
- Wang, K., Xie, X., Wang, J., Zhao, A., Peng, Y., & Rao, Y. (2020). Effects of infill characteristics and strain rate on the deformation and failure properties of additively manufactured polyamide-based composite structures. *Results in Physics*, 18.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458.
- Wang, Y.-L., Lee, Y.-H., Chiu, I.-J., Lin, Y.-F., & Chiu, H.-W. (2020). *Molecular Sciences Potent Impact of Plastic Nanomaterials and Micromaterials on the Food Chain and Human Health*.
- Wolf, S., Teitge, J., Mielke, J., Schütze, F., & Jaeger, C. (2021). *ZBW-Leibniz Information Centre for Economics Environmental Policy The European Green Deal-More Than Climate Neutrality*.
- Wong, K. v., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10.
- Yadav, P., Sahai, A., & Sharma, R. S. (2021). Strength and Surface Characteristics of FDM-Based 3D Printed PLA Parts for Multiple Infill Design Patterns. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102(1), 197–207.
- Zhao, H. X., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586–3592.
- Zhao, X. (2017). *Introduction to EPS and XPS Two Exterior Insulation Used*.
- Zheng, R., Tanner, R. I., & Fan, X.-J. (2011). *Injection Molding*.