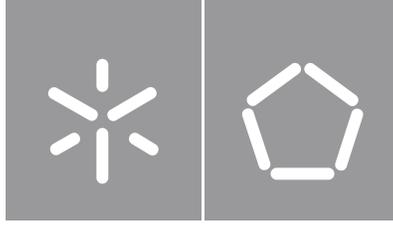




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ivan Emanuel Frederico Leite

**Design de Produto com elementos
embebidos para Manufatura Aditiva**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ivan Emanuel Frederico Leite

**Design de Produto com elementos
embebidos para Manufatura Aditiva**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Produto

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor António José Pontes
Professor Doutor Álvaro Miguel Sampaio

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

CC BY

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

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.

Design de Produto com elementos embebidos para Manufatura Aditiva

Resumo

A capacidade de fabricar um produto através da manufatura aditiva (impressão 3D), possibilita a conceção de produtos com características únicas, que através de outros processos de fabrico não seria exequível ou simplesmente não viável.

Numa primeira fase, foram realizados testes, onde se pôs em prática técnicas e estratégias relativas ao processo de embeber componentes no interior de produtos, durante o seu processo de fabrico. Estas estratégias, englobaram perceber a influência e importância dos passos relacionados com toda a metodologia envolvida, desde o planeamento associado à modelação 3D, que compreende a fase de levantamento dimensional dos componentes e atribuição de compensações dimensionais nas cavidades, passando pelo processo de *slicing*, onde se tem controlo sobre a suspensão temporária do processo de impressão (na camada pretendida), juntamente com parâmetros influenciadores como altura e padrão de camada, até à fase de embeber o componente, onde por vezes é necessário realizar uma preparação com a estabilização da sua superfície superior, embeber uma estrutura de atravancamento para bloquear o componente no interior da cavidade, ou recorrer a uma estrutura de suporte externa, quando o componente é parcialmente embebido e necessita de sustentação.

Numa segunda fase, foi feita uma análise e comparação dos resultados obtidos, permitindo validar os métodos e estratégias utilizadas, percebendo quais os aspetos de maior relevância e como estes poderiam ser implementados posteriormente, na conceção de um produto híbrido.

No contexto de desenvolvimento de produto, foram desenvolvidos conceitos que beneficiassem da tecnologia e processo de embeber componentes, finalizando com a produção de um protótipo.

Palavras-chave: Embeber, Estrutura, Impressão 3D, Produto Híbrido, Painel Modular

Product Design with embedded elements for Additive Manufacturing

Abstract

The ability to manufacture a product through additive manufacturing (3D printing) enables the design of products with unique characteristics that would not be feasible or simply not viable through other manufacturing processes.

In the first phase, tests were conducted to implement techniques and strategies related to the process of embedding components inside products during their manufacturing process. These strategies involved understanding the influence and importance of steps related to the entire methodology involved, from planning associated with 3D modeling, which includes the dimensional survey phase of the components and the assignment of dimensional compensations in the cavities, to the slicing process, where there is control over the temporary suspension of the printing process (on the desired layer), along with influencing parameters such as layer height and layer pattern, to the phase of embedding the component, where sometimes it is necessary to prepare by stabilizing its upper surface, embedding a blocking structure to lock the component inside the cavity, or resorting to an external support structure when the component is partially embedded and needs support.

In the second phase, an analysis and comparison of the results obtained were conducted, allowing the validation of the methods and strategies used, understanding which aspects are most relevant and how they could be implemented subsequently in the design of a hybrid product.

In the product development context, concepts were developed that benefited from the technology and process of embedding components, culminating in the production of a prototype.

Keywords: 3D Printing, Hybrid Product, Insert, Structure, Modular Panel

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS	xi
LISTA DE SIGLAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivo e metodologia	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Tecnologia e processo de embeber	3
2.2. Contração do material e compensação dimensional	4
3. MÉTODOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	5
3.1. Máquina, material, <i>softwares</i> e componentes externos	5
3.2. Procedimento do teste de compensação dimensional	7
3.3. Procedimento dos testes com componentes embebidos	8
3.3.1. Componente externo: porca sextavada M10 e M5	8
3.3.1.1. Orientação vertical (eixo Z)	8
3.3.1.2. Orientação horizontal (eixo X)	9
3.3.1.3. Orientação oblíqua (ângulo 45°)	10
3.3.1.4. Combinação orientações e porca de união	12
3.3.2. Componente externo: parafuso sextavado M10	13
3.3.2.1. Orientação horizontal (eixo X)	13
3.3.2.2. Orientação vertical (eixo Z)	14
3.3.3. Componente externo: rolamento	15
3.3.4. Componente externo: cabo de aço com cerra-cabos	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1. Teste de compensação dimensional	17
4.2. Teste do componente externo: porca sextavada M10	18
4.2.1. Orientação vertical (eixo Z)	18

4.2.2. Orientação horizontal (eixo X)	23
4.2.3. Orientação oblíqua (ângulo 45°).....	24
4.3. Teste do componente externo: parafuso M10	25
4.3.1. Orientação horizontal (eixo X)	25
4.3.2. Orientação vertical (eixo Z)	26
4.4. Teste do componente externo: porca sextavada M5	28
4.5. Componente externo: rolamento e cabos de aço	30
5. CASO DE ESTUDO	32
5.1. Conceito – geral.....	32
5.2. Elementos e mecanismos de conexão	32
5.2.1. Conector de mangueira	33
5.2.2. Fecho de pressão.....	33
5.2.3. Cabide de vassoura	34
5.2.4. Mecanismo retrátil e íman	35
5.3. Estrutura.....	38
5.3.1. Estrutura V1	39
5.3.2. Estrutura V2	41
5.3.3. Elementos complementares	43
5.4. Testes	46
5.5. Conceitos.....	55
5.5.1. Conceito 1 – Painel comunicativo e personalizável.....	55
5.5.2. Conceito 2 – Painel de revestimento de fachada	57
5.5.3. Conceito 3 – Painel acústico modular.....	58
5.6. Protótipo	60
6. CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS.....	66
Anexo I – Imagens ilustrativas dos conceitos	66
Anexo II – Imagens representativas do protótipo	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina Elegoo Neptune 3 Max.....	5
Figura 2 – Filamento PLA utilizado.....	5
Figura 3 – Componentes externos utilizados nos testes iniciais	6
Figura 4 – Paralelepípedo em aço inoxidável	7
Figura 5 – Peça teste de compensação dimensional nos eixos X e Y	7
Figura 6 – Peça teste de compensação dimensional no eixo Z	8
Figura 7 – Modelos 3D dos testes com porcas M10 e M5.....	8
Figura 8 – Sequência do processo de embeber uma porca sextavada na orientação vertical (eixo Z).....	9
Figura 9 – Modelos 3D do sólido quadrangular e estrutura de atravancamento interna.....	10
Figura 10 – Sequência do processo de embeber uma porca sextavada na orientação horizontal (eixo X) ..	10
Figura 11 – Modelos 3D do sólido com cavidade oblíqua e estrutura de atravancamento interna	11
Figura 12 – Sequência do processo de embeber uma porca sextava na orientação oblíqua (ângulo 45°)	11
Figura 13 – Peça com três porcas embebidas através da combinação de orientações	12
Figura 14 – Porca de união sextava M10 embebida na orientação vertical (eixo Z).....	12
Figura 15 – Estrutura de atravancamento interna para embeber um parafuso de cabeça sextavada M10 na orientação horizontal (eixo X)	13
Figura 16 – Sequência do processo de embeber um parafuso de cabeça sextavada na orientação horizontal (eixo X).....	13
Figura 17 – Parafuso de cabeça sextavada M10 posicionado verticalmente	14
Figura 18 – Estrutura interna para revestir a cabeça do parafuso sextavado M10.....	15
Figura 19 – Sequência do processo de embeber um parafuso de cabeça sextavada na vertical (eixo Z) ...	15
Figura 20 – Sequência do processo de embeber um rolamento na orientação vertical (eixo Z).....	15
Figura 21 – Sequência do processo de embeber cabos de aço na orientação vertical (eixo Z).....	16
Figura 22 – Dimensões e resultados da peça teste de compensação dimensional relativa aos eixos X e Y	17
Figura 23 – Dimensões e resultados da peça teste de compensação dimensional relativa ao eixo Z.....	17
Figura 24 – Peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M10 na orientação vertical (eixo Z).....	20
Figura 25 – Estrutura de atravancamento interna utilizada para embeber uma porca sextavada na orientação horizontal (eixo X)	23
Figura 26 – Peça teste com porca sextava M10 embebida na orientação horizontal (eixo X).....	24

Figura 27 - Estrutura de atravancamento interna utilizada para embeber uma porca sextavada na orientação oblíqua (ângulo de 45°)	24
Figura 28 - Peça teste com porca sextava M10 embebida na orientação oblíqua (ângulo de 45°).....	25
Figura 29 - Peça teste com Parafuso M10 embebido numa posição perpendicular à base de impressão (eixo X)	26
Figura 30 - Peça teste com Parafuso M10 embebido numa posição vertical (eixo Z)	27
Figura 31 - Acabamento superficial da peça teste com Parafuso M10 embebido numa posição vertical (eixo Z)	27
Figura 32 - Peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M5 na orientação vertical (eixo Z)	28
Figura 33 - Estrutura interna utilizada para embeber o rolamento	30
Figura 34 - Peça teste com rolamento embebido	30
Figura 35 - Cavidade e estrutura de atravancamento interna da peça teste relativa aos cabos de aço	31
Figura 36 - Cabo de aço embebido em dois pontos de ancoragem	31
Figura 37 - Conector 1: conector de mangueira	33
Figura 38 - Conector 2: fecho de pressão. (reproduzido de: Leroy Merlin, s.d.b)	34
Figura 39 - Conector 3: cabide de vassoura. (reproduzido de: Leroy Merlin, s.d.b).....	35
Figura 40 - Mecanismo retrátil	35
Figura 41 - Botão retrátil utilizado num forno	36
Figura 42 - Componente normalizado com mecanismo retrátil.....	36
Figura 43 - Elemento de conexão intermédio.....	37
Figura 44 - Mecanismo retrátil com elemento de conexão intermédio	37
Figura 45 - Módulo com íman embebido no centro da parte traseira.....	38
Figura 46 - Perfil em alumínio 40x80 mm. (reproduzido de: Norelem, s.d.b)	39
Figura 47 - Cantoneira com tampa, parafusos e porcas. (reproduzido de: Norelem, s.d.a)	39
Figura 48 - Estrutura V1	40
Figura 49 - Tubos de perfil quadrado e redondo	41
Figura 50 - Tipos de abraçadeiras de conexão (adaptado de: Norelem, s.d.c).....	41
Figura 51 - Estrutura V2.....	42
Figura 52 - Pormenor estrutura V2	43
Figura 53 - Elementos complementares V1 na estrutura	44
Figura 54 - Pormenor elemento complementar V1	44
Figura 55 - Elementos complementares V2 na estrutura	45

Figura 56 – Elementos complementares V2	46
Figura 57 – Elemento complementar V2 com indicação da localização do íman	46
Figura 58 – Etapas do processo de fabrico dos módulos teste 1 e 2	47
Figura 59 – Primeiras camadas com fraca aderência	48
Figura 60 – Camadas posteriores	48
Figura 61 – Módulos teste 1 e 2	49
Figura 62 – Módulo teste 3.....	50
Figura 63 – Fragmento de estrutura: teste do mecanismo	50
Figura 64 – Fixação do primeiro módulo	51
Figura 65 – Fixação do segundo módulo.....	51
Figura 66 – Dois módulos fixados	52
Figura 67 – Módulo fixado com elemento de conexão intermédio	53
Figura 68 – Encaixe simplificado com ímanes e estrutura de atravancamento.....	53
Figura 69 – Etapas de produção do módulo otimizado	54
Figura 70 – Módulo otimizado	55
Figura 71 – Painel comunicativo e personalizável com módulos quadrados.....	56
Figura 72 – Painel comunicativo e personalizável com módulos de formas distintas.....	57
Figura 73 – Painel de revestimento de fachada.....	58
Figura 74 – Módulos acústicos.....	59
Figura 75 – Módulo de cortiça (pormenor)	59
Figura 76 – Painel acústico de absorção	60
Figura 77 – Elemento complementar V2 e abraçadeira cruzada produzida	61
Figura 78 – Protótipo do painel comunicativo e personalizável (fragmento).....	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de impressão gerais.....	6
Tabela 2 – Dados dimensionais relativos aos testes com porcas sextavadas M10 embebidas na orientação vertical (eixo Z).....	21
Tabela 3 – Dados relativos aos tipos de preparação e parâmetros do padrão das camadas, utilizados nos testes com porcas sextavadas M10 embebidas na orientação vertical (eixo Z)	22
Tabela 4 – Dados dimensionais relativos aos testes com porcas sextavadas M5 embebidas na orientação vertical (eixo Z).....	29
Tabela 5 – Dados relativos aos tipos de preparação e parâmetros do padrão das camadas, utilizados nos testes com porcas sextavadas M5 embebidas na orientação vertical (eixo Z).....	29

LISTA DE SIGLAS

CAD – *Computer-Aided Design*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

PEI – Polietierimida

PLA – Ácido Polilático

PVC – Policloreto de vinila

PVP – Polivinilpirrolidona

STL – *Stereolithography*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A manufatura aditiva, mais concretamente a impressão 3D, é uma tecnologia de produção que permite fabricar objetos tridimensionais, habitualmente utilizada desde a produção de protótipos a produtos finais. Esta tecnologia dispõe de vários processos de fabrico, que podem ser selecionados de acordo com as suas características e requisitos do objeto a fabricar, sendo também possível escolher o material mais adequado, desde polímeros e compósitos a cerâmicos e metais.

O princípio do seu funcionamento está na adição de material camada por camada, através de um modelo 3D (ficheiro CAD), possibilitando o fabrico de produtos com geometrias impossíveis de alcançar em tecnologias tradicionais (Sampaio, et al., 2020). A dispensabilidade da criação de ferramentas de produção (p. ex. moldes), garante ainda produções rápidas e de pequena escala, contribuindo para a rentabilidade económica.

O processo de produção baseado na adição de material, camada por camada, viabiliza o desenvolvimento de produtos híbridos, compostos por dois ou mais materiais ou componentes externos embebidos durante um único processo de impressão (Lima, et al., 2017), através de uma suspensão temporária (programada) do mesmo (Markforged, s.d.a). Deste modo, é possível conceber um produto com características complexas, onde a combinação de materiais distintos melhora as suas propriedades mecânicas, proporcionando novas funcionalidades e liberdade de design (Vaezi, 2013, citado por Sampaio, et al., 2020), que de outra forma seria impraticável ou pouco viável.

1.2 Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como principal objetivo a exploração e o desenvolvimento de estratégias e práticas, que permitem embeber componentes ou materiais externos num produto durante o seu processo de fabrico. Assim, pretende-se perceber as possíveis interações e compatibilidades entre os componentes externos e a tecnologia e material utilizado, como a influência e a importância do dimensionamento e preparação do ficheiro CAD. Desta forma, pretende-se definir metodologias, que contribuam positivamente para a produção de produtos híbridos através da tecnologia FDM, que garante controlo e acessibilidade imediata na manipulação do objeto extrudido, durante o processo de impressão através da suspensão do mesmo. Por fim, procura-se desenvolver um conceito de um produto híbrido

funcional (acompanhado de protótipo), que justifique este processo de fabrico onde se apliquem as estratégias desenvolvidas.

Este trabalho tem uma componente prática preponderante, onde foi necessária a realização de vários testes, com a respetiva análise e comparação de resultados. Logo, foi possível determinar qual a melhor abordagem, dependendo do design e das características do componente externo embebido, e perceber quais os fatores influenciadores a ter em consideração, nas diferentes fases de conceção, desde todo o desenvolvimento conceptual, modelação 3D, *slicing* do ficheiro CAD até à produção.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, o primeiro capítulo compreende a introdução, cujo enquadramento refere o tema da dissertação juntamente com a apresentação dos objetivos a alcançar e uma breve explicação da metodologia aplicada, seguindo-se de uma descrição da estrutura da dissertação. No segundo capítulo, realiza-se a revisão bibliográfica onde são descritos os fundamentos teóricos mais relevantes para o trabalho, como metodologias para o processo de embeber e a importância da compensação dimensional. O terceiro capítulo refere a descrição detalhada do processo, metodologias e estratégias utilizadas para realização dos testes, onde inicialmente é feita uma introdução à máquina, material, *software slicer*, parâmetros de impressão e componentes externos utilizados nos respetivos testes. No quarto capítulo, é feita uma demonstração e comparação de resultados juntamente com uma análise, onde se determinam as estratégias e os fatores relevantes para embeber componentes externos durante o processo de impressão em tecnologia FDM. No quinto capítulo é demonstrado o caso de estudo, onde foram aplicadas as técnicas desenvolvidas, começando pela introdução ao conceito geral definido, seguindo-se todo o desenvolvimento associado, desde a seleção dos componentes externos posteriormente utilizados, passando pela idealização de elementos complementares, até à realização de testes de validação e melhoramento de resultados. Neste capítulo são também apresentados três conceitos baseados em três aplicações distintas para o conceito geral que termina com uma demonstração do protótipo acompanhada pelo processo de produção. O sexto capítulo compreende uma conclusão geral da dissertação. Por último, incluem-se as referências bibliográficas e os anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tecnologia e processo de embeber

A tecnologia FDM é um processo de impressão 3D, que consiste na extrusão de um material ou compósito na forma de filamento, sobre uma base de impressão, onde o material é depositado numa sucessão de camadas, criando desta forma um objeto tridimensional (Markforged, s.d.c). O processo inicia-se com a preparação de um ficheiro 3D (CAD), geralmente exportado em formato STL, onde este passa por um processo de conversão denominado de *slicing*, responsável por transformar o ficheiro 3D num conjunto de comandos que a máquina consiga executar (*g-code*). No *software slicer* é ainda possível ajustar parâmetros de impressão como orientação do modelo, altura de camadas, velocidades, temperaturas, percentagem de enchimento, entre outros. (Kolla, 2021).

O processo de embeber um componente externo no interior de um objeto/produto fabricado através da tecnologia FDM, requer um planeamento onde se deve ter em consideração vários fatores, como por exemplo: precisão e conhecimento das tolerâncias dimensionais da máquina; função, geometria, material e tipo de superfície que o componente externo possui; dimensão, posicionamento e orientação do componente embebido, e geometria do produto final (Markforged, s.d.a). A abordagem necessária para o processo de embeber um componente externo num produto, difere sobretudo consoante a geometria do componente e posição/orientação em que este é embebido, sendo por vezes necessário recorrer a um inserto secundário (estrutura de atravancamento interna) responsável por atravancar o componente no interior da cavidade (Markforged, s.d.b) e ainda proporcionar uma superfície plana para a deposição do material posteriormente extrudido.

2.2 Contração do material e compensação dimensional

A contração do material é um aspeto relevante quando se dimensiona um modelo 3D, pois pode comprometer a qualidade de possíveis encaixes entre componentes. Existem vários fatores que afetam a contração do material, nomeadamente, parâmetros como a temperatura de extrusão, temperatura da base de impressão, espessura das camadas e velocidade de impressão. Com os devidos ajustes nestes parâmetros é possível contornar o comportamento do material utilizado que habitualmente tende a contrair (Zhu, 2017). A contração do material ao longo dos eixos X e Y tem um comportamento semelhante, ao contrário da contração no eixo Z que apresenta uma maior dispersão devido à altura das camadas (Quarto, 2021).

Os parâmetros de impressão estão claramente relacionados com a calibração adequada da máquina utilizada, sendo algo essencial e que se deve ter em conta, para que seja possível minimizar o número de elementos que influenciam diretamente a compensação dimensional. Quando a máquina não é devidamente calibrada estes elementos afetam a quantidade de material extrudido, podendo ter influência em aspetos como a altura da camada e a espessura da parede, através do excesso ou insuficiência de material extrudido. De maneira a obter resultados mais consistentes e precisos, é necessário calibrar a base de impressão relativa ao eixo Z; os passos (*E-steps*) do extrusor; o rácio do fluxo de material extrudido; o sistema de aquecimento; a retração do filamento e a pressão acumulada no extrusor.

A compensação dimensional é um fator de elevada importância, quando existe o objetivo de conectar diferentes componentes entre si para que exista um encaixe justo entre um componente embebido e a parte produzida através da tecnologia FDM, sendo que a qualidade deste encaixe tem bastante impacto no funcionamento de um potencial produto. É importante que as compensações sejam atribuídas de forma correta, de acordo com a percentagem de contração que ocorre durante o processo de arrefecimento, o que depende do material utilizado. (Filament2print, 2023).

3 MÉTODOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

3.1 Máquina, material, *softwares* e componentes externos

Para a realização deste trabalho, utilizou-se uma máquina de impressão 3D (FDM) devidamente calibrada, denominada de Elegoo Neptune 3 Max (Figura 1). A máquina possui uma capacidade de impressão de 420x420x500 mm, sendo constituída por um sistema de extrusão *direct drive*, um *nozzle* de 0,4 mm, um sensor de nivelamento e uma plataforma de impressão magnética removível (flexível) PEI.



Figura 1 - Máquina Elegoo Neptune 3 Max.

O material utilizado para a impressão dos testes e protótipos foi um filamento de PLA na cor preta, do fabricante Elegoo, representado na Figura 2. Este filamento apresenta $1,75 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ de diâmetro e requer uma temperatura de extrusão de 190°C a 220°C.



Figura 2 - Filamento PLA utilizado.

Quanto ao *software slicer* utilizado, optou-se pelo UltiMaker Cura v5.4.0 devido à possibilidade de controlar facilmente parâmetros, como por exemplo, a programação da suspensão temporária do processo de impressão nas camadas desejadas e a capacidade de modificar a localização ou remover parcialmente as estruturas de suporte geradas automaticamente.

Na Tabela 1 estão representados os parâmetros de impressão gerais utilizados ao longo da produção dos testes e protótipo.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão gerais

Parâmetro	Valor
<i>Nozzle Temperature</i> (mm)	205
<i>Bed Temperature</i> (mm)	60
<i>Layer Height</i> (mm)	0,16
<i>Line Width</i> (mm)	0,4
<i>Wall Thickness</i> (mm)	0,8
Velocidade de impressão geral (mm/s)	60
Preenchimento (%)	15

Na Figura 3 estão representados os componentes externos selecionados para a realização dos testes iniciais: porcas sextavadas M5 e M10 (C.E. - 1); parafusos de cabeça sextavada M10 (C.E. - 2); porca de união sextavada M10 (C.E. - 3); rolamento de esferas de 22 mm (C.E. - 4) e cabos de aço com dois tipos de cerra-cabos (C.E. - 5).



Figura 3 – Componentes externos utilizados nos testes iniciais.

3.2 Procedimento do teste de compensação dimensional

Numa fase inicial foram realizados dois testes de compensação dimensional com o intuito de obter uma escala de valores que indicasse a melhor compensação para os eixos X, Y e Z. Estes valores são relevantes para a criação dos modelos 3D, porque permitem fabricar objetos com maior precisão dimensional. De maneira a obter os valores necessários, utilizou-se como referência um paralelepípedo em aço inoxidável (Figura 4) com 14,95 mm de altura, 14,95 mm de largura e 50 mm de comprimento.



Figura 4 - Paralelepípedo em aço inoxidável.

Após o levantamento dimensional da peça de referência, com o auxílio de um paquímetro digital, procedeu-se para a modelação tridimensional e produção de duas peças de teste com seis cavidades quadradas de dimensões variáveis. A primeira peça representada na Figura 5, teve como intuito testar compensações que envolvessem os eixos X e Y, já a peça representada na Figura 6 teve como objetivo testar compensações relativas ao eixo Z.

Em ambos os testes foram aplicados incrementos de 0,05 mm entre cavidades, desde a primeira que representava o valor nominal do perfil quadrado da peça de referência (14,95 mm) até à sexta cavidade cuja dimensão era 15,20 mm.



Figura 5 - Peça teste de compensação dimensional nos eixos X e Y.

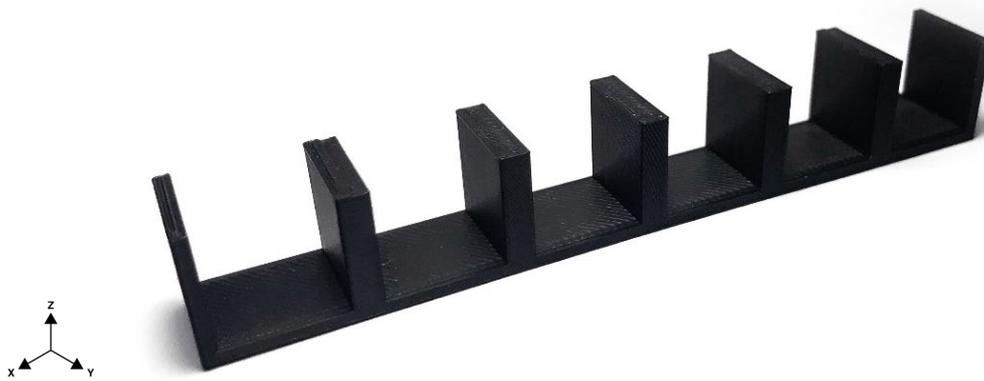


Figura 6 – Peça teste de compensação dimensional no eixo Z.

3.3 Procedimento dos testes com componentes embebidos

3.3.1 Componente externo: porca sextavada M10 e M5

3.3.1.1 Orientação vertical (eixo Z)

A realização dos testes onde os componentes foram embebidos na orientação vertical paralelos à base de impressão, iniciou-se com um levantamento dimensional de todos os componentes com o auxílio de um paquímetro digital. Em seguida foram modelados dois sólidos cilíndricos com um orifício central e dimensões proporcionais aos respetivos componentes (Figura 7). Para a porca sextavada M10, utilizou-se um cilindro com 40 mm de diâmetro externo e 12 mm de altura, quanto à porca M5, utilizou-se um cilindro com 20 mm de diâmetro externo e 8 mm de altura. No seu interior foram modeladas cavidades cuja geometria representasse o negativo das porcas sextavadas M10 e M5.

Durante os testes executados foram também testados diferentes modos de preparação do componente externo, nomeadamente, limpeza superficial com álcool isopropílico, pré-aquecimento do componente e colocação de cola (PVP) sobre as superfícies superiores dos componentes.

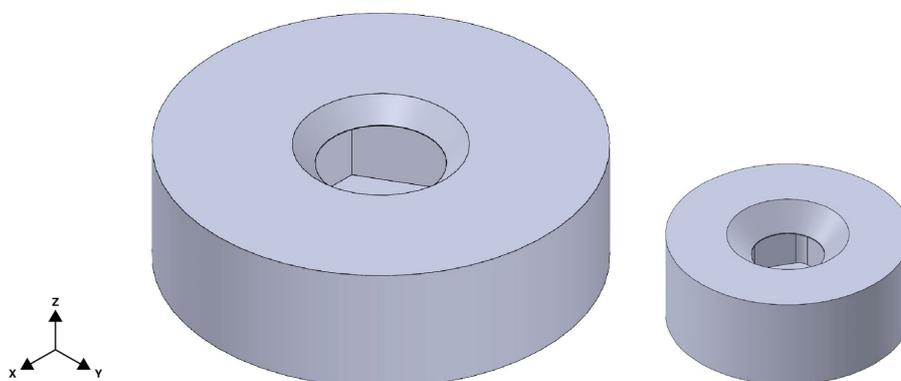


Figura 7 – Modelos 3D dos testes com porcas M10 e M5.

O processo de embeber as porcas sextavadas nos cilindros previamente referidos, consistiu essencialmente numa sequência de três etapas representadas na Figura 8: a primeira etapa, correspondeu à produção parcial do cilindro e à suspensão automática (temporária) do processo de impressão após a conclusão da última camada da cavidade (E - 1); a segunda etapa, ocorreu durante este período de suspensão onde o componente foi colocado no interior da cavidade e o processo de impressão foi retomado (E - 2); por fim, a terceira etapa consistiu na conclusão da impressão que resultou num sólido cilíndrico com uma porca sextavada embebida no seu interior (E - 3).



Figura 8 - Sequência do processo de embeber uma porca sextavada na orientação vertical (eixo Z).

3.3.1.2 Orientação horizontal (eixo X)

Após a realização dos testes onde as porcas sextavadas foram embebidas numa posição paralela à base de impressão, decidiu-se explorar outras orientações e para isso optou-se por testar a orientação horizontal onde o componente é embebido numa posição perpendicular à base de impressão (ao longo do eixo X) que por sua vez, necessitou de uma nova estratégia de modo a atravancar o componente no interior da cavidade e criar uma superfície plana e suscetível à deposição do filamento. Com esse objetivo foram modelados dois sólidos quadrangulares com um orifício central, proporcionais aos componentes externos, nomeadamente com 40 mm de altura, 40 mm de largura e 12,20 mm de espessura para a porca sextavada M10. Foi ainda modelada uma estrutura de atravancamento interna fundamental para a nova abordagem (Figura 9). Quanto ao interior dos sólidos quadrangulares foram modeladas as cavidades tendo em conta não só as dimensões dos componentes externos, mas também as dimensões da estrutura de atravancamento interna sendo condição necessária na utilização da estratégia.

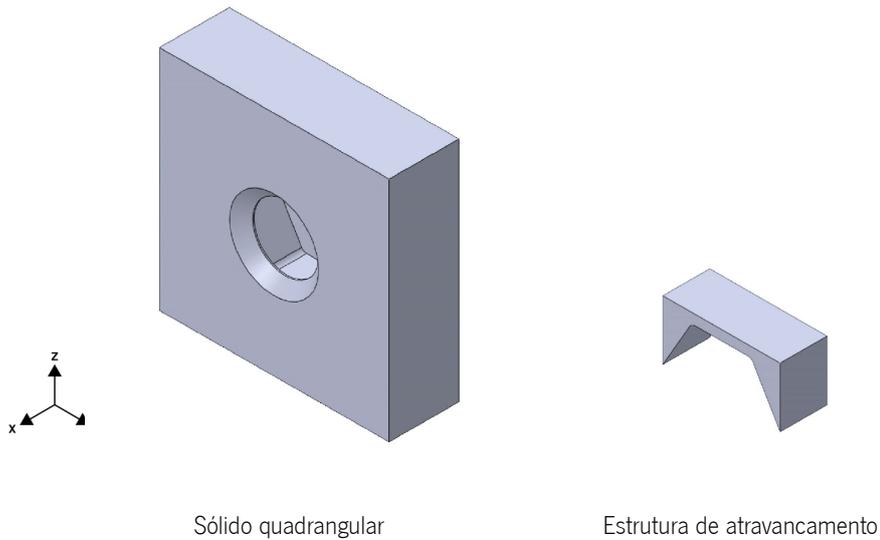


Figura 9 - Modelos 3D do sólido quadrangular e estrutura de atravancamento interna.

De modo a conseguir embeber o componente externo horizontalmente, foi necessário adicionar outra etapa à sequência anteriormente referenciada como é demonstrado na Figura 10. Esta nova etapa (E - 3) consistiu em embeber uma estrutura de atravancamento interna que envolvesse o componente, adaptando-se ao preenchimento das irregularidades ou desníveis geométricos, provenientes da geometria do componente externo em questão.

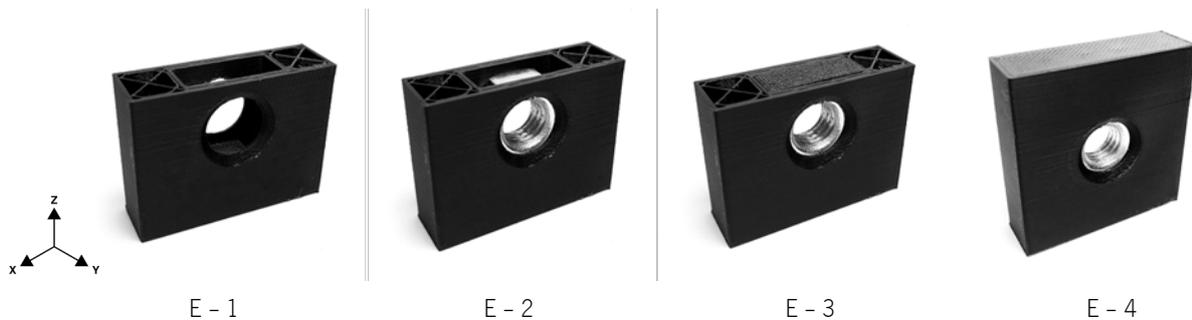


Figura 10 - Sequência do processo de embeber uma porca sextavada na orientação horizontal (eixo X).

3.3.1.3 Orientação oblíqua (ângulo 45°)

Em seguida testou-se o processo de embeber um componente numa posição de 45° relativa à base de impressão onde foi necessário utilizar a mesma técnica de embeber uma estrutura de atravancamento interna sobre o componente externo. Para tal, foi modelado um sólido com sensivelmente 25 mm de altura, 25 mm de largura e 25 mm de comprimento, a cavidade necessária e uma estrutura de

atravancamento interna, ambos representados na Figura 11. Relativamente à estrutura de atravancamento, esta sofreu alterações de forma em relação à estrutura utilizada no processo anteriormente descrito, devido ao ângulo de 45° , que influencia não só a orientação e a direção em que o componente é embebido, como também a geometria da estrutura de atravancamento.

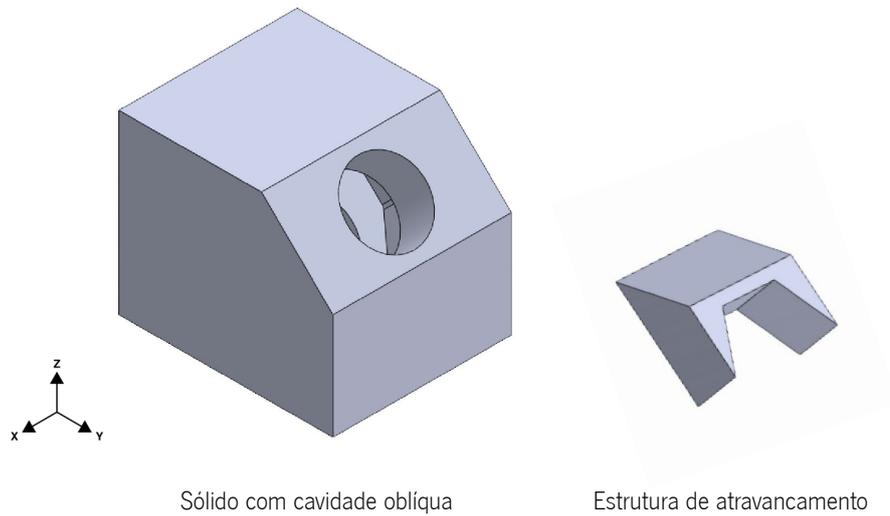


Figura 11 – Modelos 3D do sólido com cavidade oblíqua e estrutura de atravancamento interna.

Neste processo seguiu-se a mesma metodologia utilizada na orientação horizontal, e como tal a sequência de embeber a porca sextavada (Figura 12) manteve-se semelhante à exceção da direção em que o componente externo e estrutura são encaixados que seguem um ângulo de 45° .

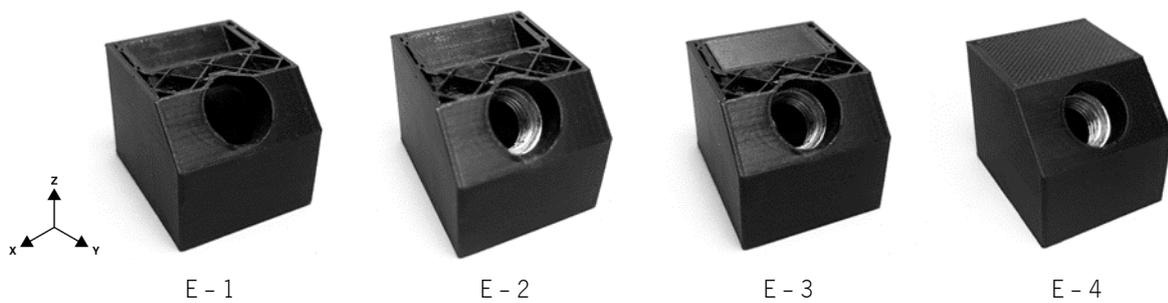


Figura 12 – Sequência do processo de embeber uma porca sextava na orientação oblíqua (ângulos 45°).

3.3.1.4 Combinação de orientações e porca de união

Após a realização dos testes previamente descritos, onde foram exploradas as três orientações (vertical, horizontal e oblíqua) decidiu-se produzir a peça representada na Figura 13, cujo objetivo foi combinar os três métodos num só processo de forma sequencial, obtendo uma peça com três porcas sextavadas embebidas.

Posteriormente, embebeu-se uma porca de união sextavada M10 numa posição vertical (Figura 14), onde se recorre ao processo inicialmente descrito.



Figura 13 - Peça com três porcas embebidas através da combinação de orientações.



Figura 14 - Porca de união sextava M10 embebida na orientação vertical (eixo Z).

3.3.2 Componente externo: parafuso M10 sextavado M10

3.3.2.1 Orientação horizontal (eixo X)

Após a realização dos testes com porcas sextavadas decidiu-se explorar o processo de embeber parafusos de cabeça sextavada M10, cuja geometria seria um pouco mais complexa e conseqüentemente mais desafiadora. Para isso, foi necessário recorrer à aplicação de novas estratégias, dependendo igualmente da posição e orientação do componente.

Inicialmente testou-se o componente posicionado horizontalmente onde foi necessário recorrer a uma estrutura de atravancamento interna (Figura 15) que envolvesse a cabeça do parafuso, de forma semelhante aos processos dos testes previamente executados. Para além da estrutura de atravancamento, foi ainda necessário recorrer à modelação de uma estrutura de suporte externa, produzida simultaneamente com a peça principal que sustentasse o peso do parafuso e que o mantivesse equilibrado paralelamente à base de impressão. Como se pode verificar, o processo consistiu numa sequência de quatro etapas (Figura 16).



Figura 15 - Estrutura de atravancamento interna para embeber um parafuso de cabeça sextavada M10 na orientação horizontal (eixo X).

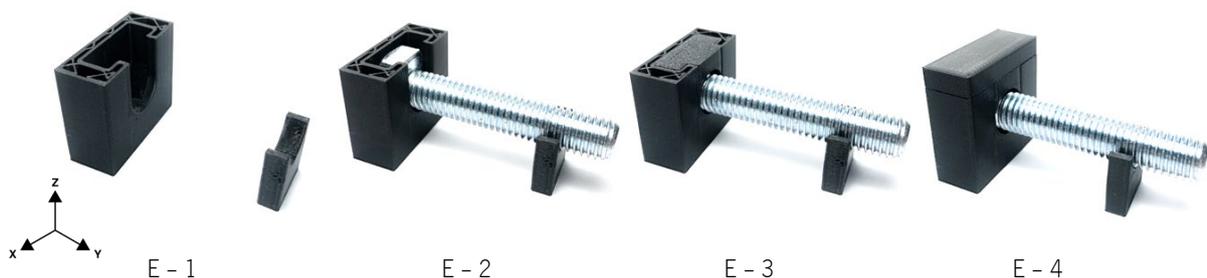


Figura 16 - Sequência do processo de embeber um parafuso de cabeça sextavada na orientação horizontal (eixo X).

3.3.2.2 Orientação vertical (eixo Z)

De maneira a ser possível embeber um parafuso numa orientação vertical com a utilização da tecnologia FDM e respeitando as suas limitações (interferências espaciais devido à cabeça extrusora), este precisa de ser posicionado verticalmente ao longo do eixo Z, de maneira que a sua cabeça esteja localizada no lado superior e a parte cilíndrica roscada no lado inferior (Figura 17).

O método utilizado para embeber este componente na posição pretendida, consistiu na utilização de duas estruturas, uma interna e outra externa semelhante aos processos utilizados nos testes anteriores, no entanto, com algumas diferenças. A estrutura interna (Figura 18), teve como objetivo revestir unicamente a face superior da cabeça do parafuso, por questões de aderência de material, enquanto a estrutura externa teve como objetivo sustentar e suportar a peça principal numa cota mais elevada que garantisse a existência da margem necessária para embeber o parafuso na vertical.

Ao contrário do processo utilizado para embeber o parafuso na horizontal a estrutura de suporte externa utilizada neste caso foi criada automaticamente no *software slicer*, após posicionar a peça principal na cota pretendida e sendo posteriormente modificada com uma abertura central para acomodar o parafuso no seu interior. Na Figura 19, estão representadas as quatro principais etapas deste processo.



Figura 17 – Parafuso de cabeça sextavada M10 posicionado verticalmente.



Figura 18 - Estrutura interna para revestir a cabeça do parafuso sextavado M10.

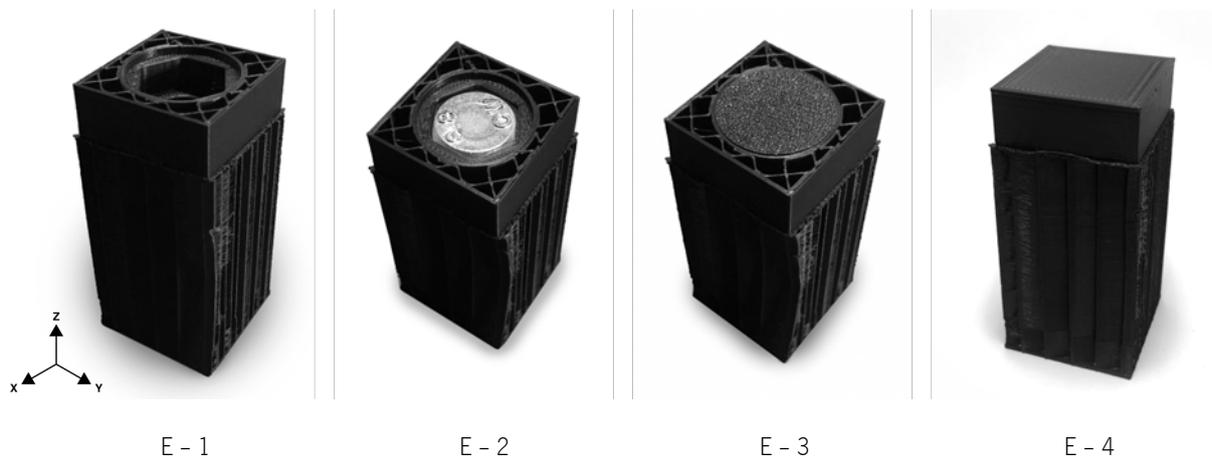


Figura 19 - Sequência do processo de embeber um parafuso de cabeça sextavada na vertical (eixo Z).

3.3.3 Componente externo: rolamento

Depois da realização dos testes com componentes de fixação normalizados decidiu-se embeber um rolamento de 22 mm de diâmetro e 7 mm de espessura. Este componente foi embebido numa posição horizontal ao longo do eixo Z, sendo fundamental a utilização de uma estrutura interna que estabilizasse os desníveis superficiais presentes no rolamento. Na Figura 20 estão representadas as etapas necessárias para embeber o componente.



Figura 20 - Sequência do processo de embeber um rolamento na orientação vertical (eixo Z).

3.3.4 Componente externo: cabo de aço com cerra-cabos

Por fim, testou-se embeber cabos de aço com 1,5 mm de diâmetro na orientação vertical (eixo Z) onde foi necessário fixar cerra-cabos nas respectivas pontas, de modo a criar pontos de ancoragem. O processo de embeber utilizou a metodologia já praticada onde é modelada uma cavidade com espaço para uma superfície interna, responsável por revestir a face superior do componente externo durante o processo de fabrico, sendo que a única diferença foi existirem dois componentes (pontas dos cabos) embebidos em simultâneo. Na Figura 21 estão representadas as quatro etapas do processo.

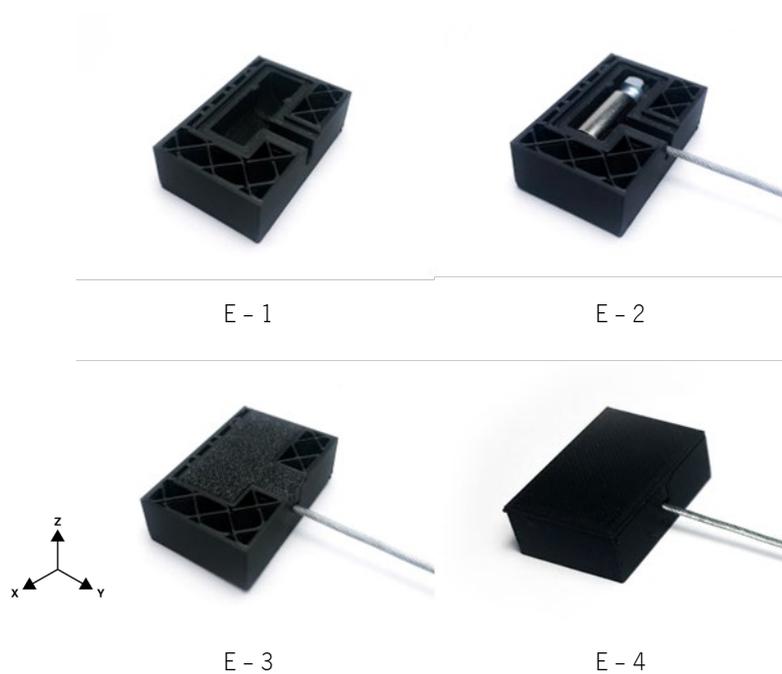


Figura 21 – Sequência do processo de embeber cabos de aço na orientação vertical (eixo Z).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de compensação dimensional

Com a realização do teste de compensação dimensional foi possível concluir que, os valores de compensação mais adequados para aplicar nas dimensões relativas aos eixos X, Y e Z, variavam entre 0 mm, 0,05 mm e 0,10 mm, dependendo do eixo e tipo de encaixe pretendido.

No teste cujo objetivo foi determinar a precisão dimensional relativa aos eixos X e Y, percebeu-se que uma compensação de 0,10 mm seria o ideal para um encaixe justo, e uma compensação de 0,05 mm para um encaixe sob pressão (Figura 22). No que se refere ao teste relativo à compensação nas dimensões do eixo Z, constatou-se que os melhores valores de compensação seriam 0 mm ou 0,05 mm, Figura 23.

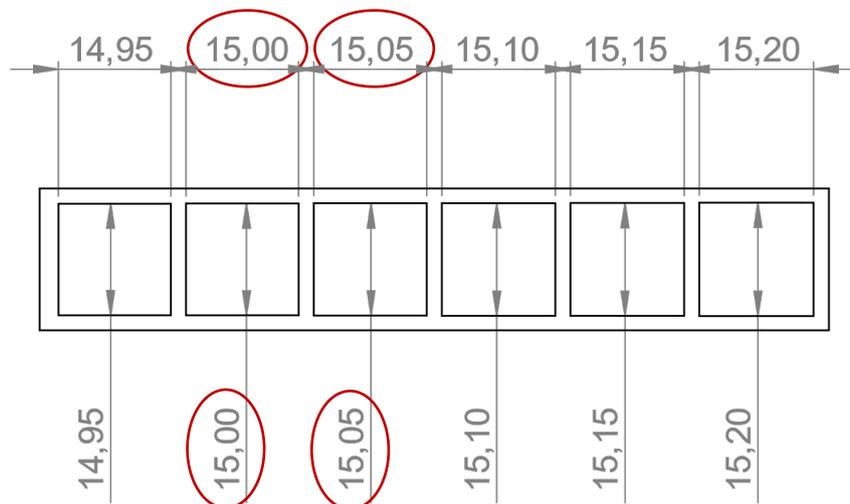


Figura 22 - Dimensões e resultados da peça teste de compensação dimensional relativa aos eixos X e Y.

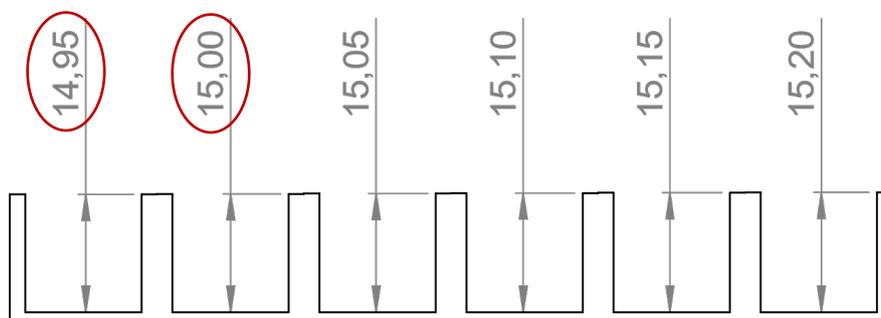


Figura 23 - Dimensões e resultados da peça teste de compensação dimensional relativa ao eixo Z.

4.2 Teste do componente externo: porca sextavada M10

4.2.1 Orientação vertical (eixo Z)

Na Figura 23 estão representadas as peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M10 na orientação vertical (eixo Z), paralelas à base de impressão. No primeiro teste cujo objetivo foi alcançar um encaixe justo foram aplicadas uniformemente compensações de 0,10 mm das dimensões relativas aos três eixos (X, Y e Z). O componente foi embebido na cavidade sem apresentar qualquer resistência friccional relativa às paredes laterais da mesma, notando-se a existência de um pequeno desnível em relação à camada superior que resultou numa ligeira folga englobando todas as faces da porca. Deste modo, a primeira camada de PLA depositada na parte superior do componente embebido não aderiu, criando desta forma artefactos de material que acabaram expostos obstruindo o orifício da rosca (T - 1).

Após analisar pormenorizadamente o encaixe da porca na cavidade notaram-se folgas inesperadas que levaram a um novo levantamento dimensional do componente em questão, notando-se que existiam pequenas variações dimensionais entre os mesmos componentes externos, embora fossem teoricamente do mesmo tamanho (M10). Posto isto, no segundo teste manteve-se a compensação de 0,10 mm relativa aos três eixos, ajustando-se a dimensão da cavidade a uma porca sextavada específica, o que contribuiu para a eliminação da maioria das folgas excessivas previamente existentes, tornando o encaixe mais justo. No entanto, o material continuou a não aderir à face superior do componente externo (T - 2), persistindo a existência de uma folga relativa ao eixo Z.

De seguida, prosseguiu-se à realização do terceiro teste onde houve uma redução da compensação do eixo Z para 0,05 mm, mantendo-se as restantes, todavia, a falta de aderência do material sobre a superfície metálica da porca persistiu e obteve-se um resultado semelhante com folga e artefactos que obstruíam o orifício da rosca (T - 3), independentemente de reduzir a compensação na dimensão relativa ao eixo Z.

Com a ausência de uma melhoria de resultados relativamente à aderência do material extrudido sobre o componente metálico e com a persistência de folga nas dimensões relativas ao eixo Z, optou-se por recorrer a técnicas que possivelmente iriam contribuir para a resolução deste problema. Com esse objetivo deu-se início ao quarto teste, onde o componente metálico foi colocado sobre a base de impressão no momento de início da produção da peça teste. Desta forma, o componente foi pré aquecido a 60°C, durante 26 minutos (tempo de produção da peça teste até à suspensão programada) e posteriormente embebido na cavidade, com a obtenção de um resultado sem sucesso, semelhante aos anteriores (T - 4).

Para a realização do quinto teste, optou-se por preparar o componente externo, através do revestimento da superfície superior da porca sextavada com cola (PVP) que contribuiu positivamente para a aderência do filamento sobre o componente metálico, resultando numa peça teste sem qualquer artefacto de material (T - 5). No entanto, ainda havia a existência de uma folga, desta vez menor, relacionada com a dimensão vertical (eixo Z).

Apesar de se ter conseguido eliminar os artefactos relativos à falta de aderência do material extrudido sobre a superfície superior do componente externo, notou-se que existia uma margem de melhoria relativa à compensação do eixo Z. Houve também a necessidade de explorar outro processo de preparação do componente e deste modo, executou-se o sexto teste onde a altura da cavidade foi definida com o valor nominal do componente para remover a compensação previamente definida. Submeteu-se ainda o componente a um processo de preparação que consistiu num pré-aquecimento intensivo com um secador de cabelo de 2300 W na potência máxima durante 3 minutos. Por fim, a porca sextavada foi embebida com sucesso e resultou numa peça teste sem qualquer folga ou artefacto superficial (T - 6), sendo este o primeiro teste onde se obteve um resultado positivo.

De maneira a entender a influência e a importância da preparação superficial do componente metálico com cola (PVP) do processo de pré-aquecimento e compensação nula na dimensão relativa ao eixo Z, executaram-se quatro novas versões (T - 2.1, T - 5.1, T - 5.2, T - 6.1) de alguns dos testes previamente realizados. No primeiro teste, denominado por teste 2.1, abordou-se a influência da preparação da superfície do componente com cola, que se revelou crucial para a existência de uma boa aderência do material polimérico sobre o metal (T - 2.1) eliminando desta forma os artefactos e a folga previamente existentes no teste 2.

Nos testes seguintes decidiu-se criar duas versões do teste 5, na qual já havia sido testada a preparação superficial do componente com cola, contudo, foram introduzidos dois novos fatores. No teste 5.1 (T - 5.1) removeu-se a compensação na dimensão relativa ao eixo Z, não sendo o suficiente para eliminar a folga existente. Quanto ao teste 5.2, para além da remoção da compensação e da colocação de cola na superfície superior do componente externo, adicionou-se o processo de pré-aquecimento com auxílio do secador de cabelo que resultou numa peça teste positiva sem qualquer artefacto de material ou folga (T - 5.2).

Quanto ao teste 6.1, descartou-se o processo de pré-aquecimento mantendo-se apenas definido o valor nominal do componente como altura da cavidade em que se obteve um resultado sem sucesso, onde os artefactos de material obstruíam o orifício da peça teste (T - 6.1). Desta forma, foi possível concluir que o pré-aquecimento do componente metálico externo foi essencial para existir uma boa

aderência do material polimérico sobre a sua superfície e conseqüentemente eliminar a folga existente na dimensão vertical (eixo Z).

Por último, foi executado o teste 7 onde se manteve uma compensação de 0,10 mm nas dimensões relativas aos eixos X e Y e compensação nula nas dimensões verticais (eixo Z). Contudo, ao invés de se recorrer aos processos de preparação do componente externo com cola ou pré-aquecimento, recorreu-se à alteração do padrão das camadas nos parâmetros de impressão onde se passou de um padrão de linha para um padrão concêntrico. Com esta técnica foi possível reduzir significativamente os artefactos criados pela falta de aderência do material polimérico na superfície metálica (T - 7), persistindo a existência de uma ligeira folga.

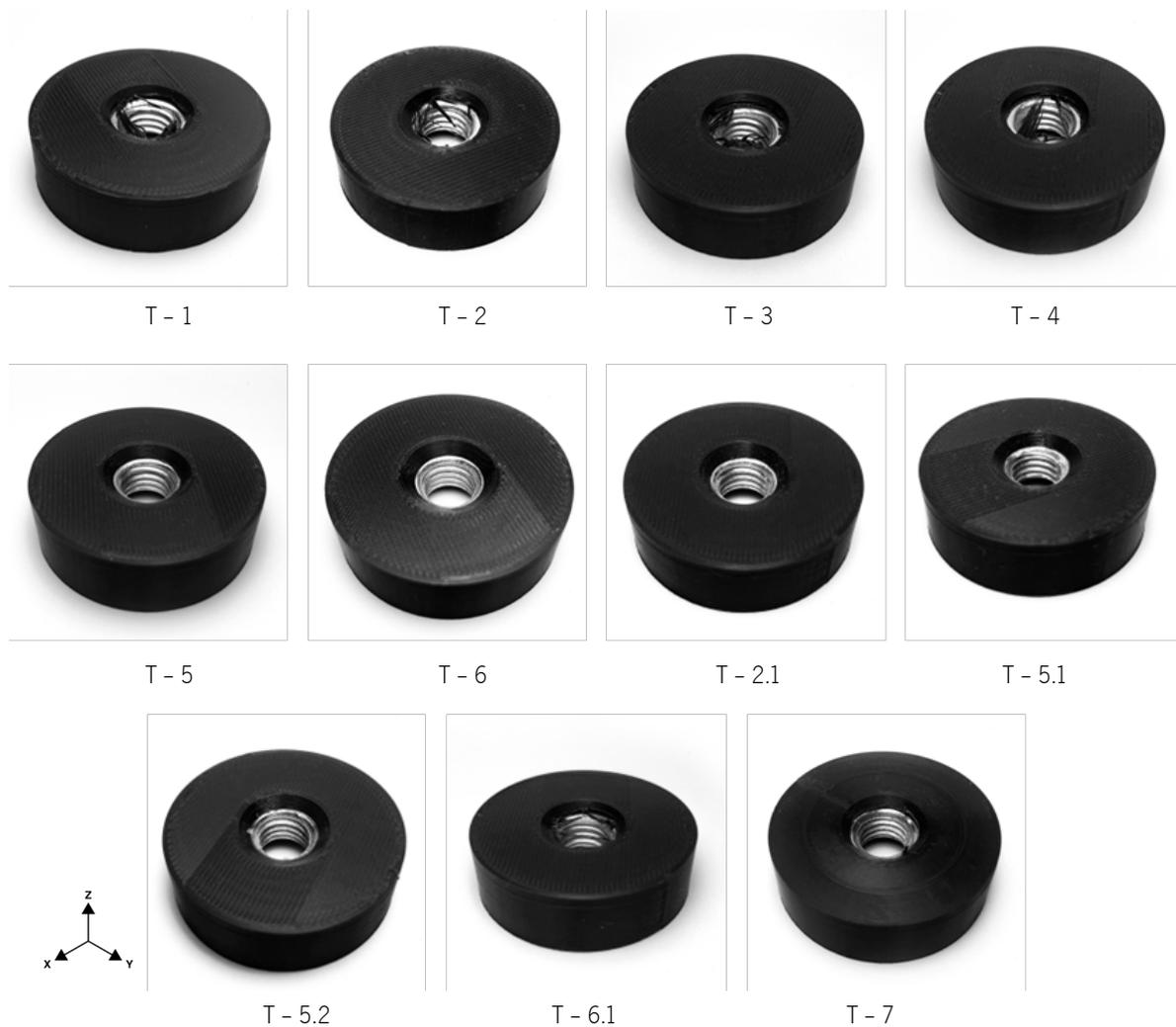


Figura 24 – Peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M10 na orientação vertical (eixo Z).

Com os testes executados e, partindo do princípio de que as compensações atribuídas às faces das cavidades (eixos X e Y) foram devidamente estabelecidas, atingiu-se o objetivo de encaixe justo. Desta

forma foi possível concluir que existem três fatores principais que influenciam a existência de folga na parte superior da cavidade. O primeiro fator a ter em consideração é a relação da dimensão nominal do componente externo, com a compensação dimensional atribuída e parâmetros no *software slicer*, como a espessura de camada. Para a realização dos testes executados foi utilizada uma altura de camada de 0,16 mm, sendo que a multiplicação deste valor define a dimensão vertical das cavidades.

Na Tabela 2 estão representadas as dimensões nominais de cada componente, assim como as compensações dimensionais atribuídas, altura das cavidades antes do processo de *slicing*, quantidade de camadas existentes nas cavidades e altura das cavidades após o processo de *slicing*. Com estes dados é possível constatar, que a cota das cavidades e a sua distância em relação ao ponto zero do eixo Z pode ficar comprometida devido à altura e conseqüentemente à quantidade das camadas necessárias. De maneira a contornar ou minimizar este entrave, é essencial ter em consideração o parâmetro de altura de camada durante o processo de modelação 3D e encontrar um equilíbrio entre a dimensão nominal do componente e altura/quantidade de camadas necessárias para a produção da cavidade.

Tabela 2 – Dados dimensionais relativos aos testes com porcas sextavadas M10 embebidas na orientação vertical (eixo Z)

Teste	Dimensões do componente (mm)	Compensação no eixo X (mm)	Compensação no eixo Y (mm)	Compensação no eixo Z (mm)	Altura da cavidade pré <i>slicing</i> (mm)	Quantidade de camadas da cavidade	Altura da cavidade pós <i>slicing</i> (mm)
T - 1	16,85 x 7,80	0,10	0,10	0,10	7,90	50	8
T - 2	16,75 x 7,75	0,10	0,10	0,10	7,85	49	7,84
T - 3	16,85 x 7,85	0,10	0,10	0,05	7,90	50	8
T - 4	16,83 x 7,82	0,10	0,10	0,05	7,87	50	8
T - 5	16,83 x 7,82	0,10	0,10	0,05	7,87	50	8
T - 6	16,83 x 7,85	0,10	0,10	0,00	7,85	49	7,84
T - 2.1	16,83 x 7,75	0,10	0,10	0,10	7,85	49	7,84
T - 5.1	16,83 x 7,75	0,10	0,10	0,00	7,75	48	7,68
T - 5.2	16,83 x 7,75	0,10	0,10	0,00	7,75	48	7,68
T - 6.1	16,83 x 7,75	0,10	0,10	0,00	7,75	48	7,68
T - 7	16,83 x 7,78	0,10	0,10	0,00	7,78	48	7,68

O segundo fator relevante é a preparação do componente externo, que influencia diretamente a deposição do material polimérico extrudido sobre a superfície do componente embebido. Dependendo do material e da textura do componente externo, pode ser necessária uma preparação superficial do componente para a aderência do polímero extrudido.

No caso dos testes realizados o material do componente externo foi o metal, e por isso, decidiu-se testar o pré-aquecimento e o revestimento superficial do componente com cola (PVP). A utilização da cola, apresentou um desempenho superior e mais consistente relativamente ao pré-aquecimento, sendo que, esta é também a opção mais abrangente, caso o material e textura sejam diferentes ou sensíveis ao calor.

O terceiro fator a ter em conta que pode afetar também a aderência do material sobre a superfície do componente, é o padrão (direção) do filamento depositado. Ou seja, dependendo da configuração geométrica do componente externo ou relevo da sua textura superficial, pode-se optar por selecionar um padrão de camada mais apropriado que melhore o trajeto e orientação da deposição do material que contribui para uma primeira camada mais consistente e uniforme.

Na Tabela 3, estão representados os tipos de preparação dos componentes e parâmetros do padrão do filamento depositado (*software slicer*) utilizados na realização dos testes.

Tabela 3 – Dados relativos aos tipos de preparação e parâmetros do padrão das camadas, utilizados nos testes com porcas sextavadas M10 embebidas na orientação vertical (eixo Z)

Teste	Tipo de preparação	Parâmetros do padrão das camadas
T - 1	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 2	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 3	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 4	Pré-aquecimento na área de impressão	Linhas
T - 5	Cola na superfície superior	Linhas
T - 6	Pré-aquecimento com secador	Linhas
T - 2.1	Cola na superfície superior	Linhas
T - 5.1	Cola na superfície superior	Linhas
T - 5.2	Utilização de cola e Pré-aquecimento com secador	Linhas
T - 6.1	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 7	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Concêntrico

4.2.2 Orientação horizontal (eixo X)

O processo de embeber a porca sextavada M10 na orientação horizontal (eixo X), perpendicular à base de impressão, exigiu uma nova estratégia que consistiu na utilização de uma estrutura de atravancamento interna representada na Figura 25. Com esta estratégia não foi necessária qualquer preparação do componente externo, visto que, após a suspensão temporária do processo de impressão o material extrudido passou a ser depositado sobre a superfície da estrutura de atravancamento, que por sua vez, é produzida com o mesmo material da peça teste principal, opondo-se ao método anteriormente utilizado onde o PLA é depositado diretamente sobre a superfície metálica do componente externo. A interação entre materiais distintos, por vezes não é a ideal, pois influencia negativamente a aderência entre o material extrudido e o material do componente embebido.



Figura 25 - Estrutura de atravancamento interna utilizada para embeber uma porca sextavada na orientação horizontal (eixo X).

Esta estratégia permite embeber componentes com geometrias mais complexas ou superfícies superiores irregulares. Desta forma, evitam-se possíveis problemas relacionados não só com o esforço necessário para cobrir zonas abertas (*bridging*) como também elimina a possibilidade da criação de artefactos de material devido à incompatibilidade entre o material extrudido e o do componente externo.

Para além da estratégia aplicada recorreu-se à utilização de compensações com base nas técnicas e fatores anteriormente estudados em que se alcançou um resultado com um encaixe justo, sem qualquer folga (Figura 26).



Figura 26 – Peça teste com porca sextava M10 embebida na orientação horizontal (eixo X).

4.2.3 Orientação oblíqua (ângulo 45°)

Para embeber componentes externos na orientação oblíqua, num ângulo de 45° em relação à base de impressão, foi necessário recorrer à mesma técnica de utilização de uma estrutura de atravancamento interna (Figura 27) que envolvesse o componente, permitindo assim a deposição do filamento extrudido sem qualquer entrave ou dificuldade. Na Figura 28, está representado o resultado onde foi possível embeber o componente com sucesso sem que existissem folgas indesejadas.



Figura 27 – Estrutura de atravancamento interna utilizada para embeber uma porca sextavada na orientação oblíqua (ângulo de 45°).

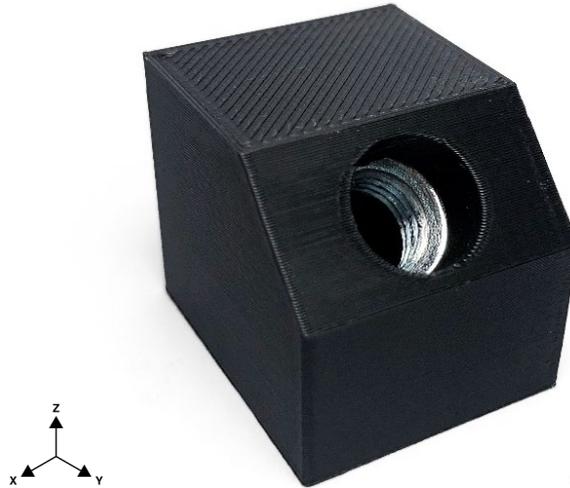


Figura 28 – Peça teste com porca sextava M10 embebida na orientação oblíqua (ângulo de 45°).

Com a realização deste teste foi possível constatar que embeber um componente externo de geometria simples numa posição não ortogonal, ou seja, que tenha um ângulo diferente de 90° em relação aos eixos X, Y e Z, assim como embeber um componente constituído por uma geometria orgânica, pode apresentar algumas dificuldades em adquirir um encaixe justo quando embebido. Este acontecimento deve-se ao facto de poderem existir diferenças de toleranciamento entre os diferentes eixos, tornando o processo de compensação mais complexo.

4.3 Teste do componente externo: parafuso de cabeça sextavada M10

4.3.1 Orientação horizontal (eixo X)

A realização deste teste permitiu entender que para além das estruturas de travancimento internas utilizadas para bloquear e estabilizar a superfície superior do componente no interior da cavidade, por vezes, pode ser necessário utilizar estruturas de suporte externas. Estas estruturas têm como função sustentar os componentes que ficam parcialmente embebidos e que estejam em posições de desequilíbrio, como é o caso do parafuso embebido na posição horizontal (eixo X). Na Figura 29, está representado o resultado deste teste, onde o componente foi embebido com sucesso, através da implementação das estratégias previamente estudadas.

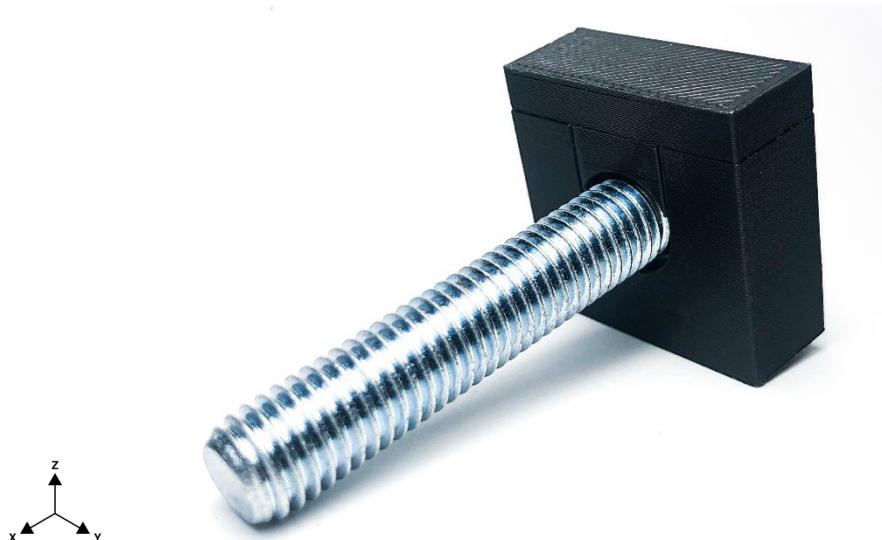


Figura 29 – Peça teste com Parafuso M10 embebido numa posição perpendicular à base de impressão (eixo X).

4.3.2 Orientação vertical (eixo Z)

Neste processo foram utilizadas duas estruturas, uma interna e outra externa com finalidades diferentes. A estrutura interna, teve como principal função, criar uma superfície plana que revestisse a superfície superior (irregular) da cabeça do parafuso, para auxiliar a deposição do filamento extrudido após a suspensão temporária do processo de impressão. Deste modo, o material foi depositado sobre uma camada de PLA (fundindo-se) o que evitou possíveis falhas devido à falta de aderência entre o polímero fundido e o metal, contribuindo para um maior controlo dimensional da cavidade. Outro aspeto positivo na utilização destas estruturas, é a capacidade de não se recorrer a processos de preparação do componente externo, como por exemplo recorrer à utilização de cola (PVP).

Quanto à utilização da estrutura externa, esta teve como função posicionar, suportar e sustentar a produção da peça teste principal, onde posteriormente o parafuso foi embebido. Esta estrutura foi criada automaticamente no *software slicer* e modificada para que fosse possível embeber o parafuso, sem qualquer tipo de entrave, como por exemplo a necessidade de remover algum material de suporte no local onde o parafuso iria encaixar. Com a utilização desta técnica foi possível embeber o componente na posição e orientação pretendida, no entanto, devido à instabilidade da estrutura de suporte externa, houve um ligeiro desvio de camadas, o que se tornou visível na peça produzida (Figura 30). Esta instabilidade estrutural pode ser corrigida, através do aumento da densidade da estrutura de suporte no *software slicer*, ou recorrer à sua substituição através de uma estrutura modelada num *software CAD*.



Figura 30 - Peça teste com Parafuso M10 embecido numa posição vertical (eixo Z).

Outro aspeto menos positivo da utilização desta técnica, é a qualidade de acabamento superficial (visível na Figura 31), da superfície em contacto com a estrutura de suporte externa que fica comprometida devido aos pontos de contacto entre a peça principal e a estrutura de suporte. No *software slicer* é possível ajustar parâmetros para melhorar a qualidade desta superfície, no entanto, não é possível atingir o acabamento de uma superfície completamente lisa, livre de qualquer irregularidade.



Figura 31 - Acabamento superficial da peça teste com Parafuso M10 embecido numa posição vertical (eixo Z).

4.4 Teste do componente externo: porca sextavada M5

Após a realização de testes com porcas sextavadas M10, houve a necessidade de embeber porcas sextavas M5 na orientação vertical (eixo Z) posicionada paralelamente à base de impressão, onde se testaram diferentes compensações relativas à altura da cavidade e tipos de preparação superficial, de maneira a determinar se a redução de tamanho do componente poderia influenciar os resultados, tendo em conta que a superfície de contacto com o componente externo é menor.

Na Figura 32 estão representadas as peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M5 na orientação vertical (eixo Z), paralelas à base de impressão. No primeiro teste (T - 1), atribuiu-se uma compensação de 0,10 mm e preparou-se o componente com uma limpeza superficial recorrendo-se à utilização de álcool isopropílico, que resultou numa peça com folga e artefacto de material na zona do orifício. O segundo e terceiro testes (T - 2 e T - 3) executaram-se da mesma forma, no entanto, a compensação passou a 0,05 mm no segundo teste, utilizando-se o valor nominal do componente para o terceiro, que resultando em duas peças teste sem qualquer folga, porém, ambas com artefactos de material. Por fim, executaram-se dois novos testes, sendo estes variações do T - 1 e T - 2, onde as compensações se mantiveram, mas o processo de preparação foi diferente, pois consistindo no revestimento da superfície superior do componente com cola, do qual resultou duas peças com folga e artefactos de material.

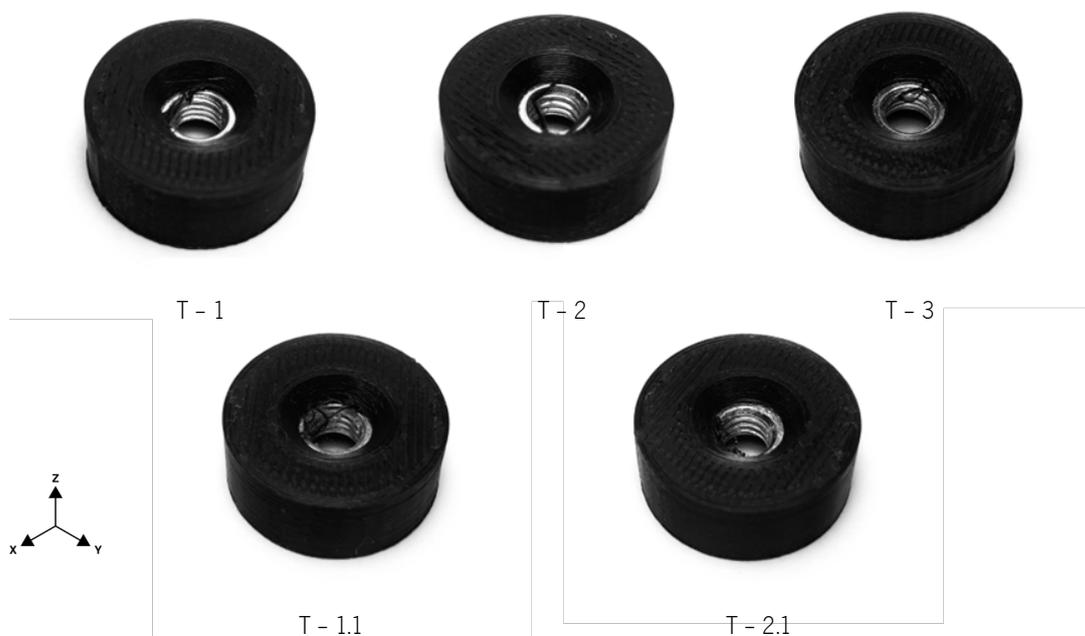


Figura 32 – Peças teste onde se embeberam porcas sextavadas M5 na orientação vertical (eixo Z).

Com a realização destes testes foi possível perceber, que a utilização de cola na superfície superior do componente não afetou positivamente o resultado, demonstrando a sua utilização ser irrelevante nestes componentes. Na Tabela 4 e 5 é possível visualizar e comparar os dados relativos a estes testes.

Tabela 4 – Dados dimensionais relativos aos testes com porcas sextavadas M5 embebidas na orientação vertical (eixo Z)

Teste	Dimensões do componente (mm)	Compensação no eixo X (mm)	Compensação no eixo Y (mm)	Compensação no eixo Z (mm)	Altura da cavidade pré <i>slicing</i> (mm)	Quantidade de camadas da cavidade	Altura da cavidade pós <i>slicing</i> (mm)
T - 1	7,89 x 3,75	0,10	0,10	0,10	3,85	24	3,84
T - 2	7,89 x 3,75	0,10	0,10	0,05	3,80	24	3,84
T - 3	7,89 x 3,75	0,10	0,10	0,00	3,75	23	3,68
T - 1.1	7,89 x 3,75	0,10	0,10	0,10	3,85	24	3,84
T - 2.1	7,89 x 3,80	0,10	0,10	0,05	3,85	24	3,84

Tabela 5 – Dados relativos aos tipos de preparação e parâmetros do padrão das camadas, utilizados nos testes com porcas sextavadas M10 embebidas na orientação vertical (eixo Z)

Teste	Tipo de preparação	Parâmetros do padrão das camadas
T - 1	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 2	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 3	Limpeza com álcool isopropílico (99,5%)	Linhas
T - 1.1	Cola na superfície superior	Linhas
T - 2.1	Cola na superfície superior	Linhas

4.5 Componentes externos: rolamento e cabos de aço

De forma a verificar a viabilidade das técnicas previamente testadas, decidiu-se embeber um rolamento, pois era um componente mais complexo em termos de função que exigia um encaixe justo para que funcionasse de maneira eficiente.

O componente foi embebido verticalmente numa posição paralela à base de impressão, recorrendo-se a uma estrutura interna (Figura 33) para estabilizar os desníveis presentes na superfície do rolamento. Pelo facto desta estrutura apresentar apenas 0,80 mm de espessura, foi necessário fixá-la com cola no momento de embeber o componente, para que esta não se deslocasse durante a deposição da primeira da camada de material extrudido. Recorreu-se ainda a um padrão de camada concêntrico para que existisse maior estabilidade durante a deposição de material.

Na Figura 34 está representada a peça teste com o rolamento embebido, onde se atingiu o objetivo pretendido de encaixe justo sem folgas.



Figura 33 – Estrutura interna utilizada para embeber o rolamento.



Figura 34 – Peça teste com rolamento embebido.

O processo utilizado para embeber os cabos de aço com os respectivos cerra-cabos, consistiu essencialmente numa repetição do processo anterior, sendo que desta vez a estrutura interna apresentava uma geometria mais complexa (Figura 35) devido à geometria dos cerra-cabos e diâmetro do próprio cabo, que por sua vez criavam uma variação de alturas dentro da cavidade.

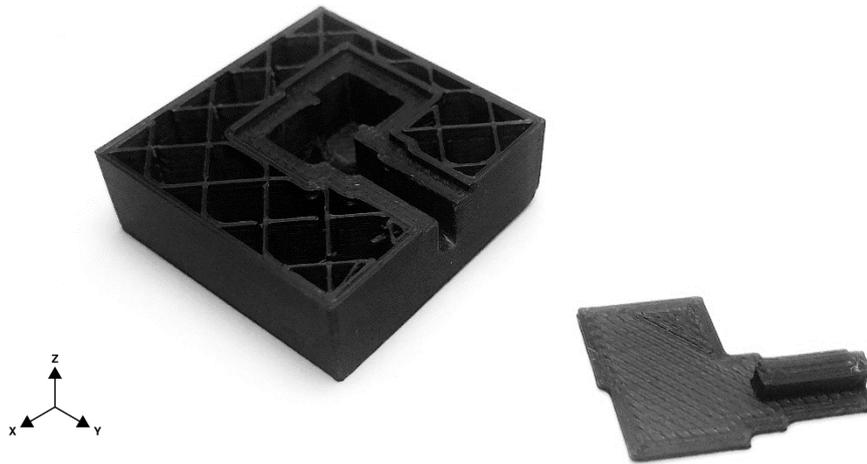


Figura 35 – Cavidade e estrutura de atravancamento interna da peça teste relativa aos cabos de aço.

Em oposição a todos os testes realizados para embeber os cabos de aço com dois pontos de ancoragem, foi necessário posicionar as peças teste estrategicamente na base de impressão com um distanciamento exato entre as pontas, para que fosse possível embeber as duas extremidades simultaneamente. O resultado (Figura 36) compreende um cabo de aço embebido com sucesso sem qualquer folga no interior das cavidades.



Figura 36 – Cabo de aço embebido em dois pontos de ancoragem.

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Conceito – geral

Consiste na criação de um painel modular constituído por um conjunto de módulos híbridos e sustentado por uma estrutura e sistema ajustável, cujo objetivo é definido pela necessidade e motivo de cada indivíduo ou entidade. De um modo geral, o painel pode desempenhar diversas funções tais como: estética, informativa, divisão de espaço, acústica, entre outras. Estes módulos são conectados a uma estrutura de instalação fixa ou temporária que pode ser completamente ajustável. A sua ajustabilidade provém desde a seleção do módulo e as suas características até à dimensão e configuração geral do painel.

Os módulos híbridos são constituídos essencialmente por três elementos dos quais dois são componentes externos e um é produzido através de fabrico aditivo. Neste caso, recorreu-se à tecnologia FDM que irá servir de veículo para a criação de um suporte de ligação (moldura) que conecta permanentemente dois componentes externos. Os componentes externos designam-se por componente principal (placa) e componente secundário (elemento conector), ambos embebidos durante o processo de impressão. O componente externo principal é aquele que terá maior destaque no painel final, sendo selecionado de acordo com a função pretendida com a possibilidade de selecionar o seu material, cor, geometria e dimensão. O componente externo secundário é o responsável por conectar o módulo à estrutura.

Quanto ao elemento produzido através de fabrico aditivo (moldura), este é desenvolvido sobretudo de acordo com a tipologia do componente externo principal (placa), adaptando-se às suas características e conseqüentemente à sua função, podendo complementá-lo não só em termos visuais como funcionais.

5.2 Elementos e mecanismos de conexão

Com os testes onde se embeberam componentes externos já realizados e o conceito geral definido, houve a necessidade de encontrar possíveis elementos de conexão normalizados que permitissem não só fixar facilmente os módulos à estrutura, como também retirá-los com alguma facilidade em caso de substituição ou ajuste. Para isso, teve-se em consideração um conjunto de requisitos, tais como: acessibilidade e facilidade na conexão e desconexão entre o módulo e a estrutura; conexão centrada sem margem para comprometer a posição dos módulos adjacentes; geometria que não prejudicasse o processo de embeber o componente, evitando estruturas de suporte, que

consequentemente pudessem causar instabilidade estrutural no processo de impressão e criassem desperdício de material.

5.2.1 Conector de mangueira

O primeiro elemento de conexão normalizado equacionado, foi o conector rápido de mangueiras representado na Figura 37, devido à facilidade e rapidez de encaixe. No entanto, rapidamente foi possível perceber que este apresentava vários constrangimentos que entravam diretamente em conflito com os requisitos pré-estabelecidos. Este, não só impossibilitava a capacidade de desconectar um módulo central do painel pelo lado frontal, como também não bloqueava o módulo na posição rotacional pretendida. Após a análise da sua geometria, posição necessária para embeber o componente de forma funcional e tendo em conta as limitações da tecnologia de fabrico, foi possível perceber que este componente seria impossível de embeber.



Figura 37 – Conector 1: conector de mangueira.

5.2.2 Fecho de pressão

O segundo componente a ter em conta devido à sua simplicidade, foi o fecho de pressão representado na Figura 38, habitualmente utilizado em mobiliário mais concretamente como fecho para portas de armários. Além de apresentar constrangimentos semelhantes ao componente anterior, este iria requerer um sistema mais complexo, composto por guias de sustentação e posicionamento que mantivessem o módulo seguro na posição desejada.



Figura 38 – Conector 2: fecho de pressão. (reproduzido de: Leroy Merlin, s.d.b)

5.2.3 Cabide de vassoura

Ainda com o conceito de simplicidade de conexão em mente, sem auxílio de ferramentas e recorrendo apenas a um encaixe sob pressão ponderou-se o conector geralmente utilizado para pendurar vassouras ou outro tipo de utensílios com cabo numa parede (Figura 39). O mecanismo deste componente assemelhava-se bastante ao fecho sob pressão, no entanto, este poderia ser encontrado com dimensões mais adequadas à utilização pretendida e consequentemente mais robusto.

Ao contrário dos sistemas de conexão anteriormente referidos que eram compostos por duas partes (macho e fêmea), onde parte seria embebida na “moldura” e outra fixada na estrutura, este é composto apenas por um componente, sendo que seria necessário complementar o sistema com uma porção de um tubo metálico de perfil redondo de maneira a encaixar no conector. Ou seja, ao invés de embeber diretamente o conector, este iria ser fixado na estrutura e apenas o tubo metálico redondo seria embebido na “moldura” adquirindo a denominação de componente externo secundário.

Apesar desta solução teoricamente funcionar de forma correta, o processo para desconectar o módulo do painel continuava a ser dificultado pelo lado frontal, contudo, possível. Para isso seria necessário recorrer a um acessório ou ferramenta externa que auxiliasse a extração do módulo, com a possibilidade de tirar partido da configuração geométrica da “moldura” para tal. Ainda assim, achou-se que existia margem de melhoramento, e houve uma necessidade que levou à procura de uma solução mais prática e acessível.



Figura 39 – Conector 3: cabide de vassoura. (reproduzido de: Leroy Merlin, s.d.b)

5.2.4 Mecanismo retrátil e íman

Em busca de uma solução que permitisse desconectar apenas um módulo do painel sem remover os adjacentes e que fosse possível fazê-lo pelo lado frontal, encontrou-se o mecanismo retrátil (Figura 40), que possui a capacidade de variar entre duas posições (aberto e fechado), sendo o movimento ativado neste caso apenas com a aplicação de força sobre a face frontal do módulo.

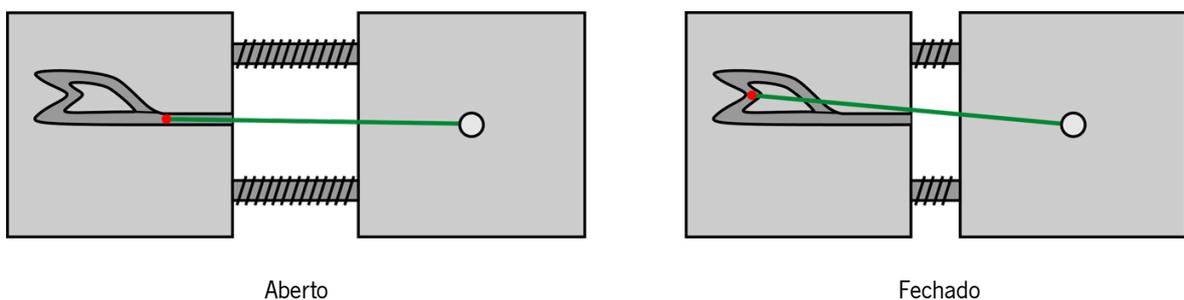


Figura 40 – Mecanismo retrátil.

Este tipo de mecanismo pode ser encontrado em produtos de utilização diária, como por exemplo em botões retráteis de eletrodomésticos (Figura 41), porém, foi necessário encontrar um componente normalizado que garantisse essa função. Para tal, recorreu-se à utilização do componente utilizado nas

válvulas dos lavatórios (Figura 42) que desempenha essa função, possuindo roscas normalizadas que facilitam a sua instalação, ou seja, à semelhança do conector previamente mencionado, este também não poderia ser embebido diretamente na “moldura”, sendo fixado na estrutura.



Figura 41 - Botão retrátil utilizado num forno.



Figura 42 - Componente normalizado com mecanismo retrátil.

Para conectar o módulo ao componente de mecanismo retrátil, foi necessário embeber uma porca sextavada M8 na moldura, mais concretamente na parte traseira do módulo, notando-se que a sua posição influenciava o posicionamento rotacional do módulo quando roscado. Para além disso, o mecanismo utilizado, apresentava um limite de extensão relativamente curto quando aberto, o que comprometia a seleção do componente principal (placa), pois a sua espessura não poderia ser superior à extensão do mecanismo, caso contrário a rotação efetuada para desenroscar o módulo do painel seria obstruída pelo contacto com as faces laterais dos módulos adjacentes.

Desta forma, optou-se por recorrer à conceção de um elemento de conexão intermédio (Figura 43) responsável por conectar o módulo ao mecanismo retrátil, sendo constituído por dois componentes embebidos, nomeadamente uma porca sextavada M8 (lado A) e um íman (lado B) posteriormente roscado no mecanismo retrátil (Figura 44).



Figura 43 - Elemento de conexão intermédio.



Figura 44 - Mecanismo retrátil com elemento de conexão intermédio.

Para o bom funcionamento deste elemento de conexão intermédio ao invés de uma porca sextavada, foi necessário também embeber um íman (componente externo secundário) na parte traseira da moldura (Figura 45) e criar um encaixe de atravancamento entre ambos.

Numa fase posterior optou-se por simplificar o sistema desenvolvido ao remover o mecanismo retrátil e o elemento de conexão intermédio, e utilizou-se apenas uma conexão através de ímanes e atravancamento, que garantisse uma boa sustentação e bloqueasse a rotação indesejada do módulo, de forma a eliminar os problemas anteriormente enfrentados.



Figura 45 - Módulo com íman embebido no centro da parte traseira.

5.3 Estrutura

Para que o painel fosse completamente modular e ajustável foi necessário projetar uma estrutura que suportasse os módulos e que permitisse dois tipos de instalação, nomeadamente uma instalação permanente e uma instalação temporária. Desta forma, decidiu-se conceber uma estrutura onde se teve como referência as estruturas utilizadas em *video walls* (compostas por painéis LCD/LED) onde predomina o conceito de painel modular.

Decidiu-se recorrer apenas à utilização de materiais e componentes normalizados que tivessem um grau de compatibilidade elevado entre si, esperando desta forma simplificar a fixação, os encaixes e os mecanismos de ajuste, que permitem contribuir para uma melhor experiência de instalação, manutenção e ajustabilidade do painel.

5.3.1 Estrutura V1

Numa primeira fase, decidiu-se desenvolver uma estrutura na qual teve-se como base perfis em alumínio e os respetivos elementos de conexão. Esta escolha surgiu devido à abundância de elementos de conexão normalizados existentes no mercado compatíveis com estes perfis, que possibilitam a montagem de estruturas com a hipótese de alterar a sua configuração, não sendo necessário recorrer a métodos de fixação permanente.

A estrutura consistia na utilização de perfis em alumínio com 40 mm de altura e 80 mm de largura (Figura 46), sendo que o comprimento seria definido consoante a dimensão geral do painel. Quanto aos perfis, estes seriam conectados entre si com o auxílio de cantoneiras e os respetivos parafusos e porcas (Figura 47) habitualmente utilizados neste tipo de aplicações.

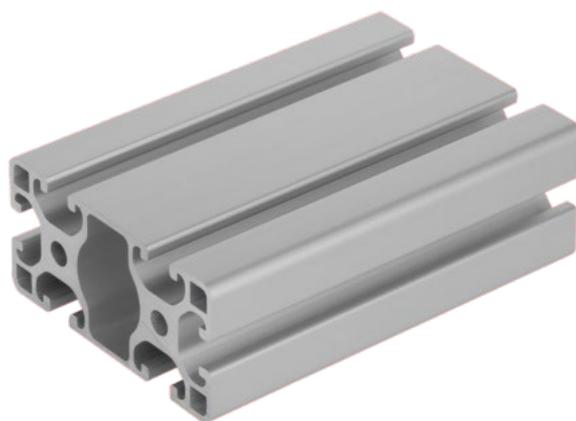


Figura 46 – Perfil em alumínio 40x80 mm. (reproduzido de: Norelem, s.d.b).



Figura 47 – Cantoneira com tampa, parafusos e porcas. (reproduzido de: Norelem, s.d.a).

Na Figura 48 está representada uma estrutura base de 3,5 m de altura por 3,5 m de largura, idealizada para acomodar quarenta e dois módulos quadrados (35x35 cm). Esta é constituída por sete perfis posicionados horizontalmente e dois perfis posicionados verticalmente, unidos entre si através de quatorze cantoneiras, cada uma conectada com quatro parafusos e respectivas porcas.

Para ajustar o espaçamento entre perfis, em caso de alteração da dimensão geral do painel ou dos módulos, seria necessário soltar as cantoneiras temporariamente e proceder ao ajuste dos perfis, o que iria tornar a tarefa de ajuste mais complicada e pouco prática, não só pela quantidade de parafusos exigidos, como também pela falta de suporte estrutural entre perfis, o que poderia dificultar e comprometer também o seu nivelamento. Outro aspeto tido em consideração foi o custo elevado dos perfis em alumínio, que contribuiu para a inviabilidade desta estrutura.



Figura 48 - Estrutura V1.

5.3.2 Estrutura V2

Após verificar que a construção da estrutura constituída por perfis em alumínio seria pouco viável, optou-se por procurar uma solução mais prática e económica. Com esse objetivo decidiu-se recorrer à utilização de tubos em aço, de perfil quadrado ou circular de 30 mm (Figura 49), devido à sua simplicidade, procurando da mesma forma um sistema de conexão normalizado, que permitisse conectar os tubos entre si.

O sistema escolhido consiste na utilização de elementos de conexão tubular (Figura 50), encontrados em diferentes tipologias, como por exemplo: abraçadeiras retas (A - 1); duplas cruzadas (A - 2 e A - 3); articuladas (A - 4); com flange (A - 5) ou com pedestal (A - 6). Esta variedade permite obter diversas soluções, que se adaptem ao motivo, espaço/local e tipo de instalação pretendida, cumprindo com o conceito de modularidade estabelecido.

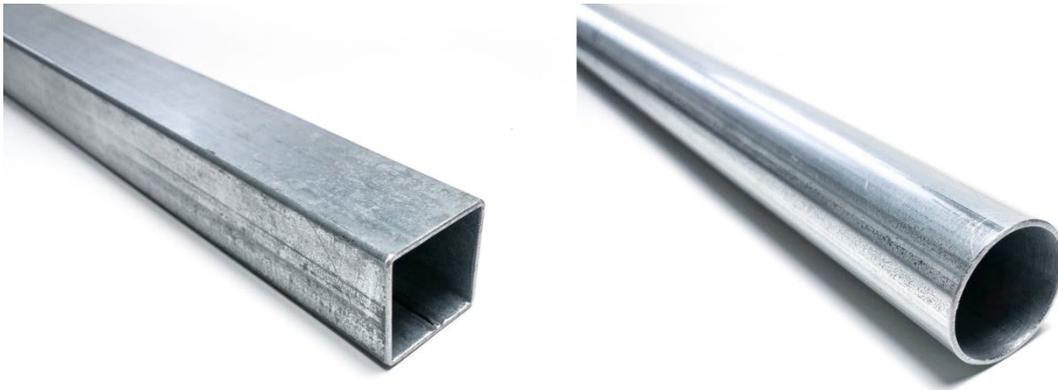


Figura 49 - Tubos de perfil quadrado e redondo.



Figura 50 - Tipos de abraçadeiras de conexão (adaptado de: Norelem, s.d.c)

Na Figura 51 está representada uma proposta de estrutura com 2,5 m de altura e 3,5 m de largura, projetada para ser fixada a uma parede ou fachada. Para esse propósito, utilizou-se três tubos de perfil circular (30 mm) para os apoios verticais e seis tubos de perfil quadrado (30 mm) posicionados horizontalmente para acomodar os módulos. Relativamente à conexão entre tubos, utilizou-se dois tipos de abraçadeiras (representadas na Figura 52), nomeadamente abraçadeiras com flange para fixar os tubos verticais à parede e abraçadeiras cruzadas duplas para conectar os tubos horizontais aos tubos de apoio (verticais).



Figura 51 – Estrutura V2.

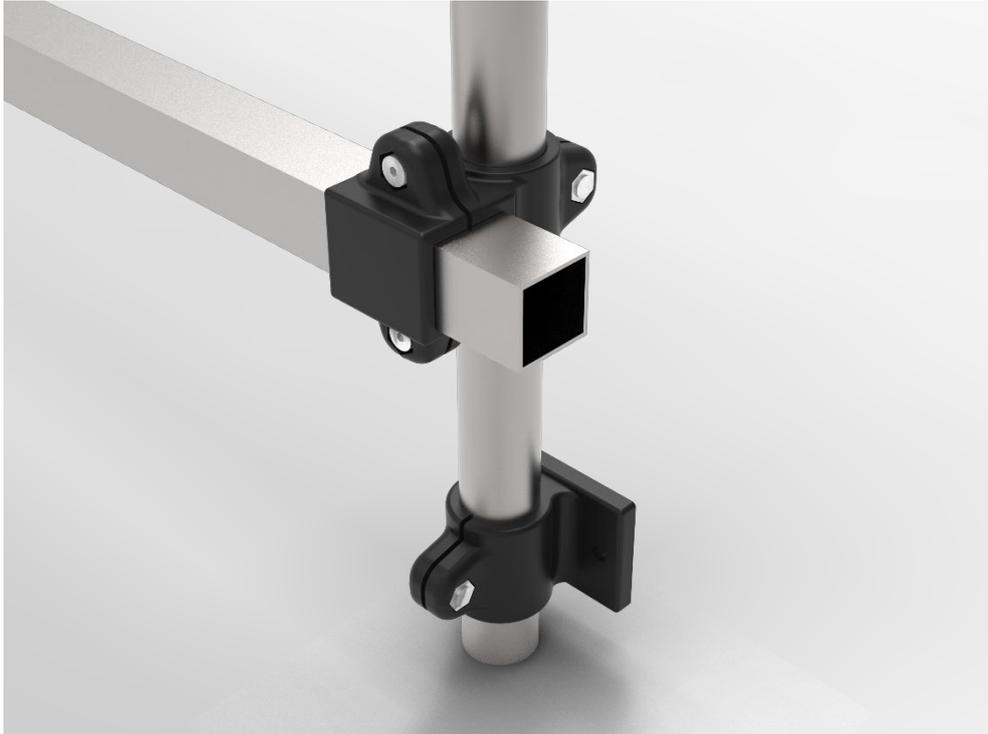


Figura 52 – Pormenor estrutura V2.

Em comparação com a primeira estrutura desenvolvida onde se pretendia utilizar perfis normalizados em alumínio e os respetivos componentes, esta proposta apresenta um grau de praticidade funcional superior, cumprindo com os requisitos estabelecidos.

5.3.3 Elementos complementares

De maneira a conseguir acoplar os elementos/mecanismos de conexão (retrátil) à estrutura que por sua vez realizam a conexão com os módulos, foi necessário desenvolver um elemento complementar, que servisse de ponto de fixação e viabilizasse a função de ajustabilidade horizontal. Este elemento foi projetado para ser instalado no momento da montagem da estrutura, sendo que a sua quantidade corresponde ao número total de módulos utilizados.

Numa primeira fase, simultaneamente com o desenvolvimento da primeira estrutura, concebeu-se o elemento complementar V1, representado na Figura 53. Este elemento, projetado para ser fabricado igualmente através da tecnologia FDM, foi idealizado de maneira a ser fixado aos perfis em alumínio através do método convencional de porcas e parafusos. Em caso de alteração do painel, este elemento poderia ser temporariamente solto e movido para um novo posicionamento horizontal, seguindo o mesmo princípio de ajustabilidade da própria estrutura. Relativamente à acoplação dos elementos/mecanismos

de conexão (retrátil), estes seriam roscados numa porca M16 previamente embebida neste elemento (Figura 54).



Figura 53 - Elementos complementares V1 na estrutura.



Figura 54 - Pormenor elemento complementar V1.

Com o desenvolvimento da estrutura V2 foi indispensável a criação de um novo elemento complementar que fosse ao encontro da nova abordagem estrutural. Com esse intuito, teve-se como referência o funcionamento das abraçadeiras de conexão tubular, decidindo-se reproduzir um componente com um sistema semelhante (Figura 55) para que desta forma fosse possível efetuar alterações estruturais, recorrendo apenas a ferramentas básicas e da mesma dimensão. Este elemento complementar foi projetado para ser o mais versátil possível, e por isso, concebeu-se as duas versões representadas na Figura 56, um ideal para tubos de perfil quadrado e outro para tubos de perfil circular.

Para reposicionar horizontalmente um destes elementos na estrutura, basta destravá-lo temporariamente através de um parafuso e deslizar o componente para o local pretendido, onde volta a ser bloqueado, simplificando-se a tarefa de ajustabilidade. Quanto à constituição do elemento, este é composto por duas partes poliméricas interligadas por uma dobradiça e projetado para ser produzido de uma só vez, inicialmente com uma porca M10 embebida, que numa fase posterior foi substituída por um íman (Figura 57), não só por questões de custo, como também por limitações relacionadas com a extensão do mecanismo (retrátil).

À semelhança do primeiro elemento idealizado, este é também instalado no momento da montagem da estrutura e a quantidade utilizada corresponde à quantidade dos módulos requeridos.

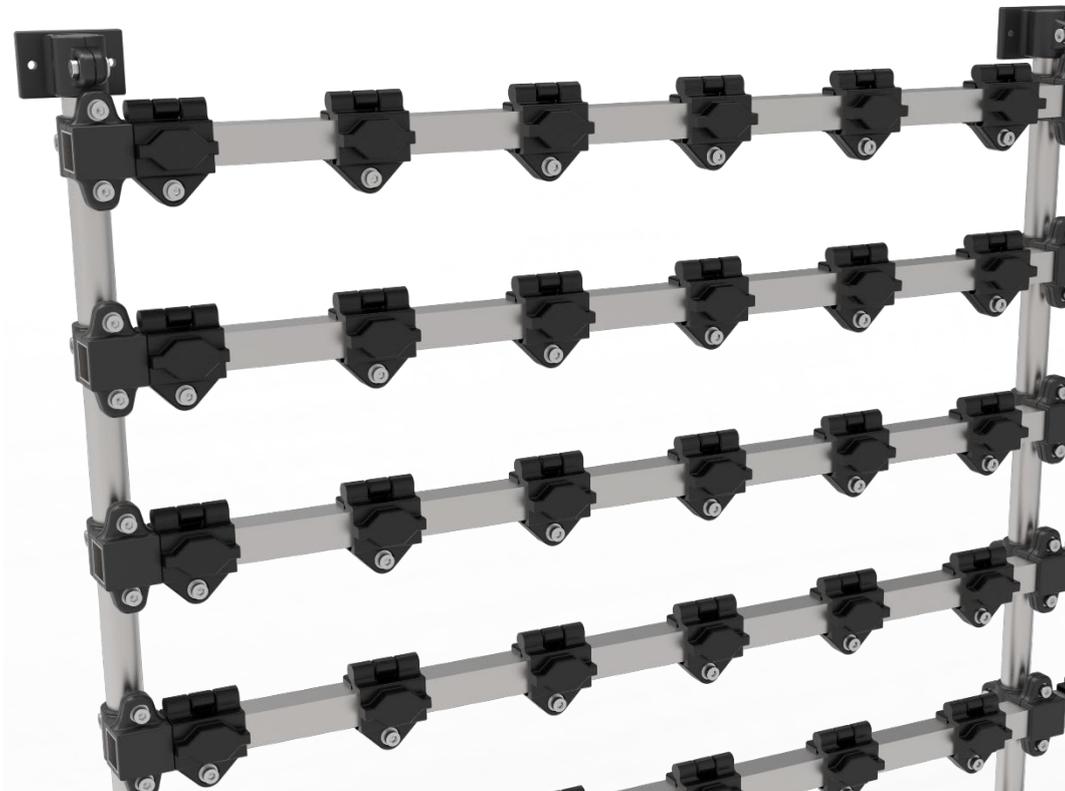


Figura 55 - Elementos complementares V2 na estrutura.



Figura 56 - Elementos complementares V2.

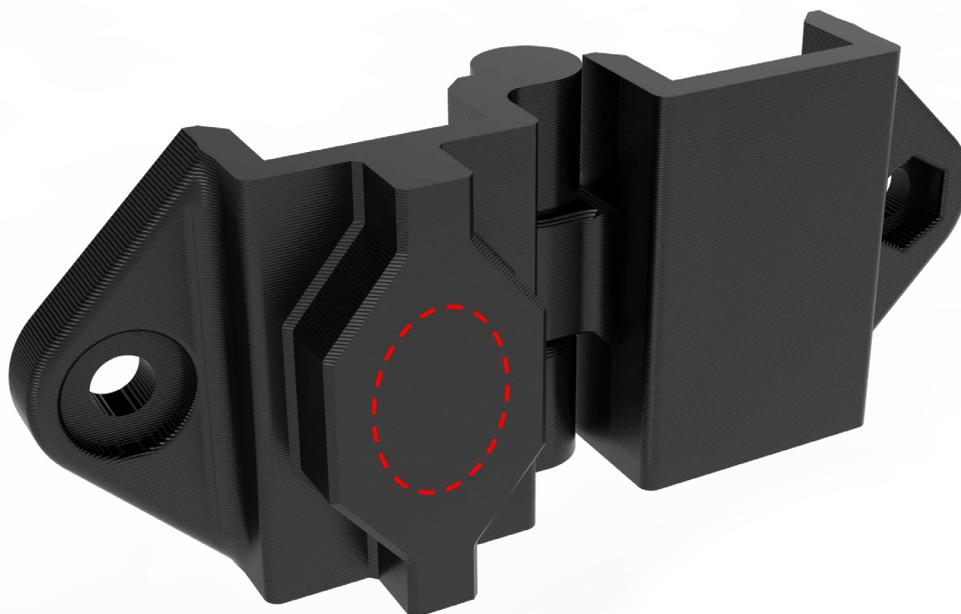


Figura 57 - Elemento complementar V2 com indicação da localização do íman.

5.4 Testes

De forma a validar o conceito geral estabelecido e perceber se o mecanismo selecionado iria funcionar como pretendido, decidiu-se realizar alguns testes onde se embeberam azulejos quadrados com 150 mm (componente externo principal), juntamente com porcas sextavadas M8 e ímanes (componente externo secundário).

Para a realização do primeiro e segundo teste, embebeu-se um azulejo e uma porca sextavada M8, cujo processo envolveu cinco etapas com intuito de verificar não só a aderência do polímero extrudido sobre a superfície cerâmica e irregular do componente externo principal, como posteriormente verificar a fixação do módulo ao mecanismo retrátil.

Na figura 58 estão representadas as cinco etapas do processo de fabrico: a primeira etapa consistiu em produzir os apoios de atravancamento frontais da moldura, seguindo-se da suspensão temporária do processo de impressão (E - 1); na segunda etapa, o azulejo previamente preparado com cola PVP, foi embebido retomando-se o processo de impressão (E- 2); de seguida, a terceira etapa consistiu na conclusão da impressão da moldura e cavidade, suspendendo-se novamente o processo (E- 3); a quarta etapa consistiu em embeber a porca sextavada, também previamente preparada com cola PVP, retomando-se o processo de impressão (E- 4); por fim, o processo foi concluído, cobrindo a cavidade e dando-se por finalizada a produção do módulo (E- 5).



Figura 58 – Etapas do processo de fabrico dos módulos teste 1 e 2.

Com este processo foi possível entender que a textura e relevo da superfície traseira dos azulejos, dificultou a deposição correta das primeiras camadas de filamento extrudido, mesmo com otimização do padrão de camada no *software slicer* e preparação dos azulejos com cola PVP, na qual surgiram alguns artefactos de material (Figura 59). Contudo, após a acumulação de algumas camadas o problema foi corrigido (Figura 60), conseguindo-se obter dois módulos funcionais (Figura 61) sem qualquer tipo de folga entre a moldura e o azulejo embebido.

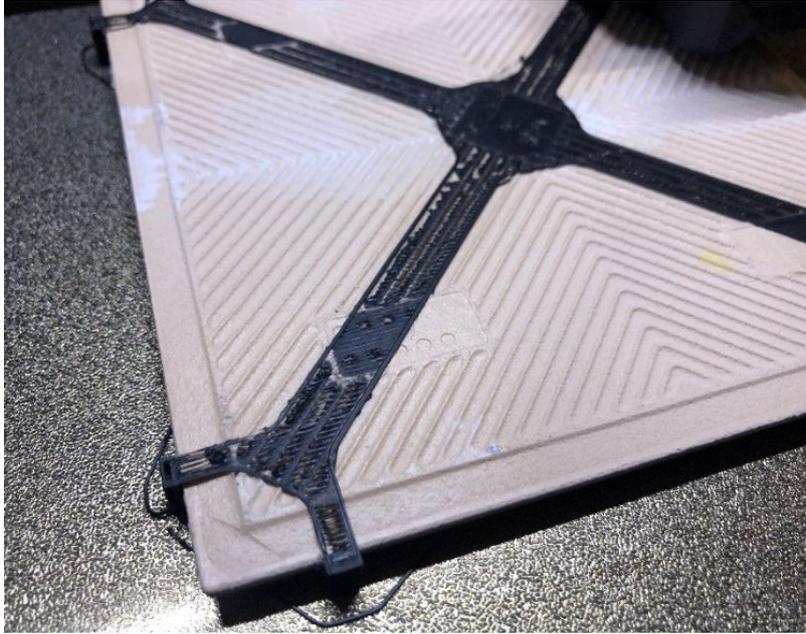


Figura 59 - Primeiras camadas com fraca aderência.

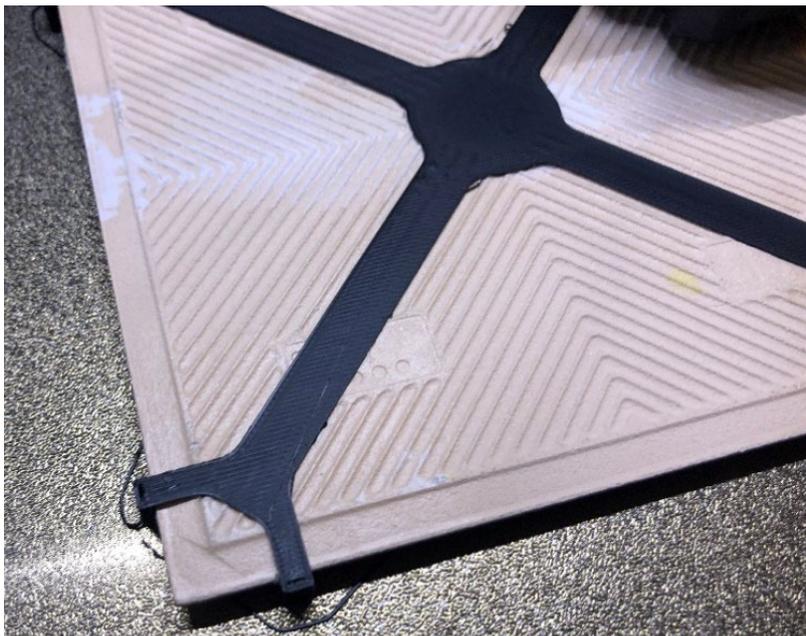


Figura 60 - Camadas posteriores.

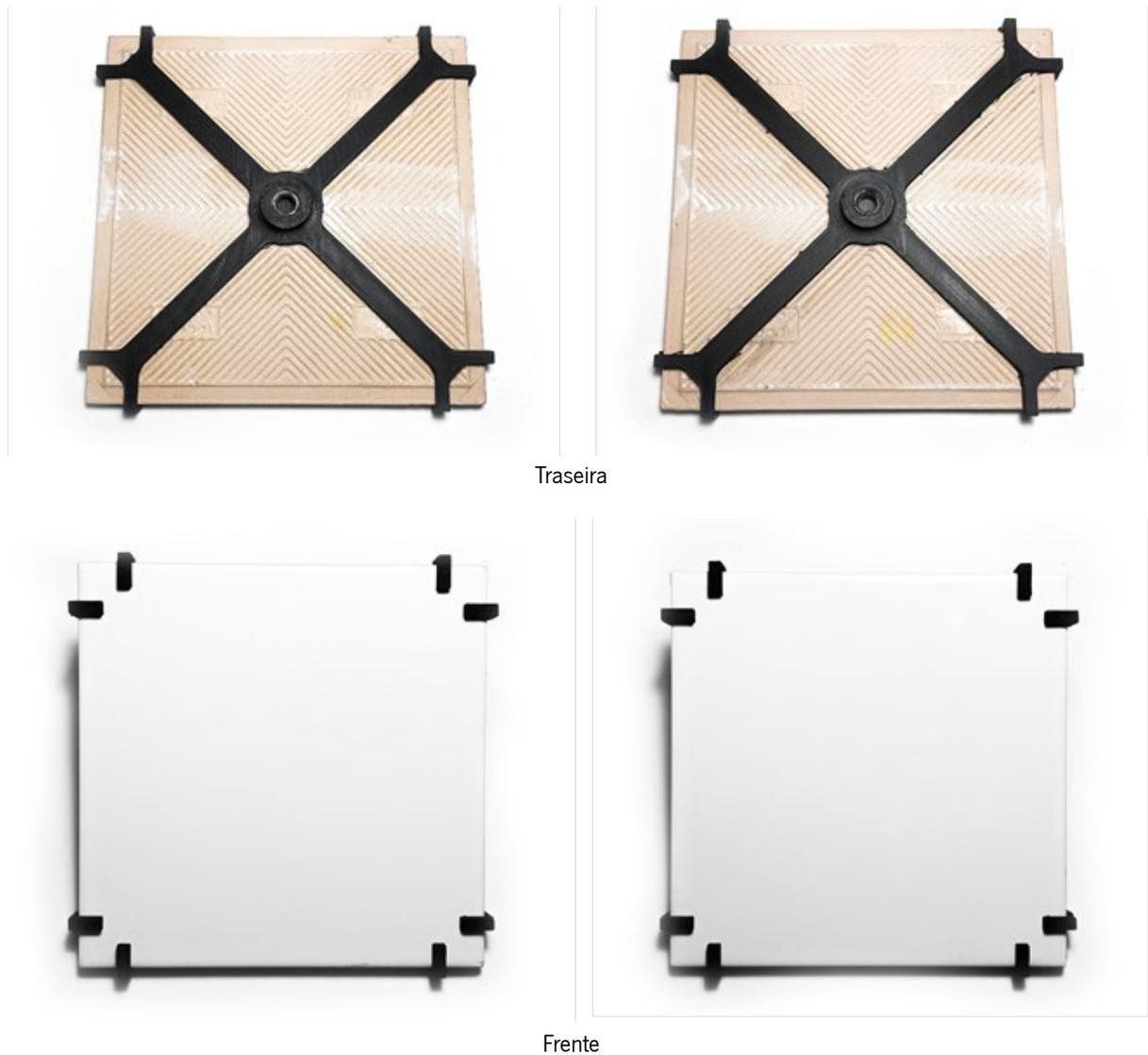


Figura 61 – Módulos teste 1 e 2.

Este processo, apesar de funcional revelou-se algo pouco viável e com bastante margem para falhas com a necessidade de uma monitorização constante, onde por vezes foi essencial algum tipo de intervenção, como por exemplo a remoção de porções de filamento, que não tivessem aderido à superfície do azulejo e conseqüentemente pudessem comprometer o restante processo de impressão.

Posto isto, decidiu-se reformular a estratégia de embeber o azulejo e executou-se a produção do terceiro módulo teste (Figura 62), optando-se por prepará-lo com a fixação de uma folha polimérica de 0.80 mm sobre a sua superfície irregular, garantindo desta forma, uma base suficientemente lisa e estável para uma deposição correta do filamento. Ao contrário da estratégia anterior, esta abordagem permitiu embeber o azulejo sem qualquer dificuldade tornando todo o processo mais seguro e viável, evitando-se a necessidade de qualquer tipo de intervenção auxiliar durante a impressão.



Figura 62 – Módulo teste 3.

Posteriormente procedeu-se ao teste da conexão e interação entre os módulos produzidos e o mecanismo retrátil. Para isso utilizou-se uma ripa de aglomerado de madeira, onde foram fixadas duas porcas M16 com um espaçamento entre si, que correspondesse à distância entre o centro de ambos os módulos posicionados lado a lado. Este pequeno fragmento de estrutura representado na Figura 63, apesar de não permitir ajustabilidade como a estrutura projetada, serviu para simular dois pontos de ancoragem onde o mecanismo retrátil seria fixado, conseguindo-se desta forma testar o funcionamento da conexão e desconexão dos módulos ao mecanismo.



Figura 63 – Fragmento de estrutura: teste do mecanismo.

O processo de fixação dos módulos ao componente de mecanismo retrátil consiste em roscar individualmente cada módulo à rosca M8 existente na ponta de cada mecanismo, porém esta etapa deve ser executada com o mecanismo aberto, ou seja, na sua posição mais extensa. De seguida, deve ser aplicada força no centro do módulo para que este seja retraído, criando espaço e margem para roscar o módulo adjacente, como é demonstrado na Figura 64.



Figura 64 - Fixação do primeiro módulo.

Com a fixação do segundo módulo representado na Figura 65, foi possível perceber que a espessura máxima do módulo era determinada e limitada pela extensão do mecanismo retrátil. O mecanismo utilizado apresentava uma extensão de 11 mm, o que impossibilitava a seleção de um componente externo principal (placa) com uma espessura superior, caso contrário a dimensão da extensão seria excedida e o processo de roscar o segundo módulo seria comprometido pelo módulo previamente colocado, pois o movimento rotacional iria estar obstruído, tornando todo o processo de fixação dos módulos impraticável.



Figura 65 - Fixação do segundo módulo.

Na Figura 66 estão representados ambos os módulos fixados corretamente, pois a sua espessura não ultrapassava a dimensão da extensão do mecanismo sendo possível roscá-los na totalidade, contudo, este constrangimento iria ter um forte impacto na seleção do componente externo principal, através da limitação da capacidade de escolha, afetando negativamente a base conceptual idealizada.

Para os módulos serem fixados de forma paralela entre si percebeu-se que a posição do mecanismo retrátil na estrutura e da porca M8 embebida na moldura teria de ser testada previamente, exigindo especial atenção no momento de instalação, pois o aperto máximo das roscas iria definir a posição rotacional do módulo quando roscado na totalidade. Este aspeto iria dificultar o processo de embeber as porcas sextavadas, aumentando o tempo de preparação dos componentes e consequentemente iria proporcionar margem para erros.



Figura 66 - Dois módulos fixados.

Após detetar todos os constrangimentos associados à utilização do componente de mecanismo retrátil, decidiu-se conceber um elemento de conexão intermédio responsável por criar uma ligação entre o módulo e o mecanismo retrátil.

O componente, constituído por uma porca sextavada M8 e um íman, apresentava ainda uma configuração geométrica capaz de auxiliar a sustentação do módulo garantindo uma posição centrada. Na Figura 67 está representado o elemento de conexão intermédio roscado no componente de mecanismo retrátil, seguindo-se do módulo fixado através do íman correspondente embebido na moldura.



Figura 67 - Módulo fixado com elemento de conexão intermédio.

Com base nos testes realizados e com o objetivo de otimizar e simplificar o sistema, de modo a facilitar a montagem, manutenção e ajuste do painel, decidiu-se substituir o componente de mecanismo retrátil juntamente com o elemento de conexão intermédio, por dois ímanes e uma geometria de atravancamento que conferisse estabilidade, sustentação e bloqueasse a rotação do módulo numa posição centrada. Na Figura 68 é demonstrado o novo método de fixação, que permite ao utilizador encaixar os módulos de forma prática e rápida. Relativamente à sua remoção, esta pode ser feita pelo lado frontal com o auxílio de uma ferramenta como a ventosa (em caso de superfícies lisas e pouco porosas), ou recorrer a um design de moldura estratégica, que possibilite a remoção do módulo.

Esta abordagem permitiu reduzir o número de componentes necessários e consequentemente reduzir o tempo de montagem e custo de fabrico.



Vista traseira



Vista lateral

Figura 68 - Encaixe simplificado com ímanes e estrutura de atravancamento.

Na Figura 69, estão demonstradas as seis etapas necessárias para a produção do módulo otimizado ao novo método de fixação, onde na parte traseira da moldura existe um íman embecido numa geometria de atravancamento compatível com a do elemento complementar V2.

A primeira etapa do processo de fabrico consiste na produção da parte frontal da moldura (E - 1), seguindo-se da suspensão temporária do processo; na segunda etapa (E - 2) o azulejo previamente preparado com a estabilização da sua superfície irregular, através da fixação de uma folha polimérica de 0.8 mm com cola rápida (cianoacrilato), é colocado na cavidade da moldura retomando-se o processo de impressão; na terceira etapa (E - 3) o azulejo é revestido com a parte traseira da moldura e o processo de impressão volta a ser suspenso após a finalização da cavidade do íman; na quarta etapa (E - 4) o íman é embecido com o auxílio de cola rápida para garantir que este não se desloque da cavidade durante a deposição das próximas camadas; de seguida, na quinta etapa (E - 5) é colocada uma estrutura interna (0.80 mm de espessura) no topo do íman para garantir a aderência do filamento extrudido das próximas camadas; por fim, a sexta etapa (E - 6) consiste na finalização da impressão, onde a geometria de atravancamento é concluída.

Com esta estratégia de produção e respetivo design é possível fabricar módulos de forma segura e com bastante consistência, contornando os problemas anteriormente encontrados durante o processo e reduzindo significativamente a possibilidade de ocorrerem falhas durante o mesmo. Na Figura 70 está representado um módulo otimizado, produzido com o método mencionado.

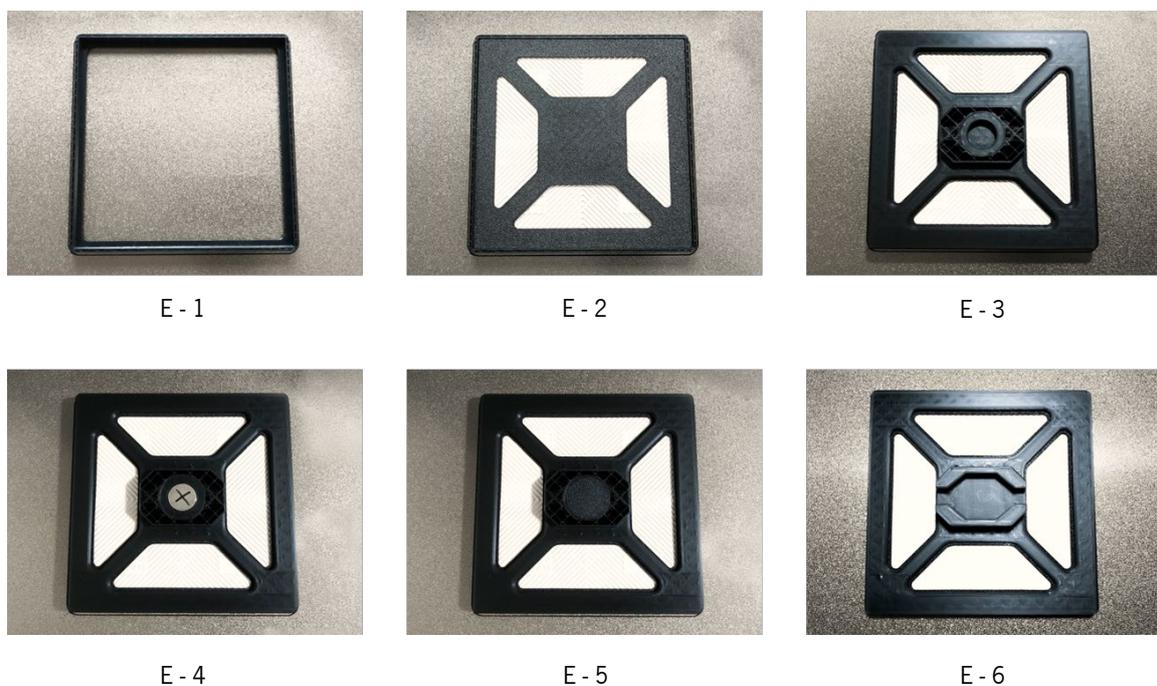


Figura 69 – Etapas de produção do módulo otimizado.



Figura 70 – Módulo otimizado.

5.5 Conceitos

Com os testes realizados, resultados obtidos e estratégias definidas, decidiu-se propor três conceitos baseados no sistema estrutural V2, onde os módulos são fixados a uma estrutura tubular ajustável, composta por tubos de perfil quadrado e circular de 30 mm, interligados com abraçadeiras cruzadas. Esta estrutura tem a possibilidade de ser instalada diretamente numa superfície plana (p. ex. parede) ou posicionada verticalmente no chão, através dos vários elementos de conexão tubular.

Como referido anteriormente este sistema estrutural é composto também pelo elemento complementar V2, responsável pela fixação dos módulos à estrutura, através de uma conexão efetuada por dois ímanes e geometria de atravancamento.

5.5.1 Conceito 1 – Painel comunicativo e personalizável

O primeiro conceito desenvolvido denominado de painel comunicativo e personalizável, tem como intuito servir de suporte de exibição para comunicar visualmente elementos gráficos ou de texto, através de *pixels*, designados neste caso de módulos. O painel terá uma elevada capacidade de ajustabilidade, permitindo ao utilizador criar diferentes configurações, dependendo da mensagem ou imagem a expressar. Esta ajustabilidade é fundamentada não só na alteração de cor e dimensão dos módulos, assim como na dimensão geral do painel que por sua vez define o detalhe gráfico exibido.

Cada módulo é constituído por um azulejo embebido, existindo a possibilidade de embeber diferentes azulejos com diferentes tamanhos, formas, cores ou texturas.

Na Figura 71 está representado um painel ilustrativo simples, com 2 m de altura e 2 m de largura, composto por azulejos pretos e brancos, com 15 cm de altura e 15 cm de largura.

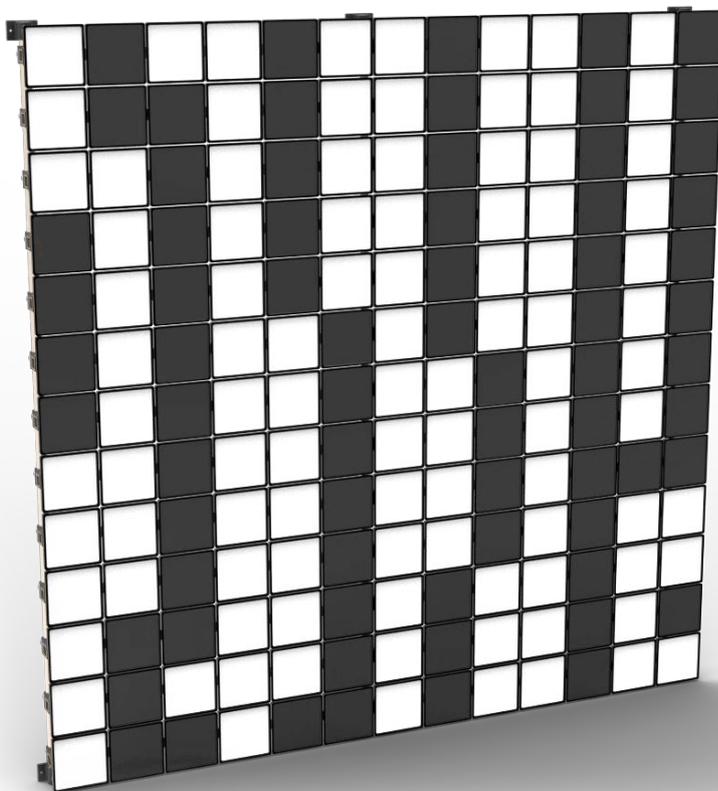


Figura 71 - Painel comunicativo e personalizável com módulos quadrados.

A utilização de módulos com formas distintas num só painel é uma das possibilidades existentes, o que permite a criação de elementos gráficos mais complexos. Na Figura 72 está representado um painel ilustrativo com 2 m de altura e 2 m de largura, composto por módulos quadrangulares, retangulares e triangulares de diferentes dimensões. Este painel exige um processo de projeção mais complexo, desde o design da moldura à configuração estrutural, de forma a encontrar um equilíbrio entre o elemento gráfico e as limitações de posicionamento dos módulos e tubos, pois é necessário calcular as distâncias entre os pontos de ancoragem, que diferem consoante a geometria e tamanho dos módulos.

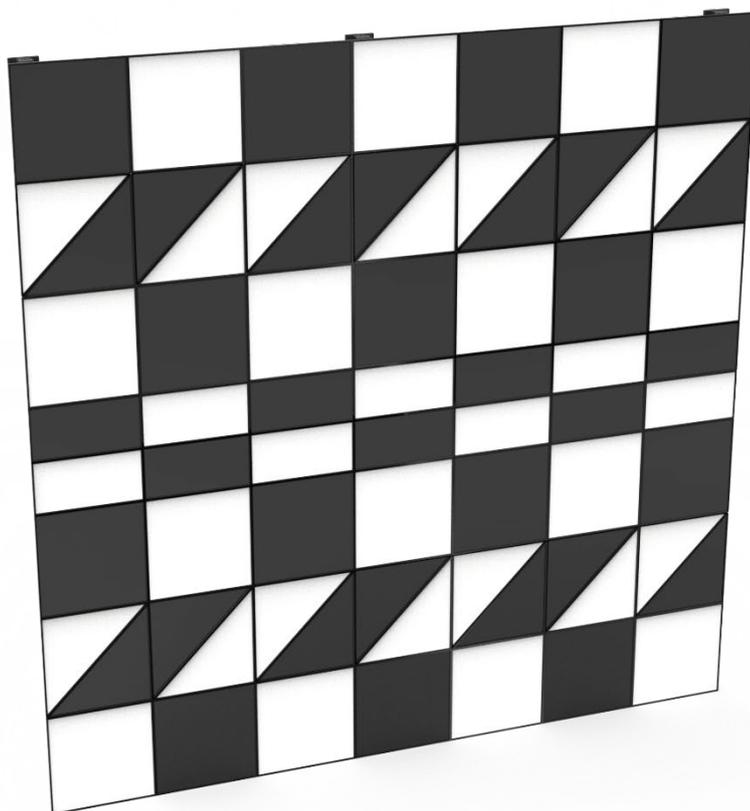


Figura 72 – Painel comunicativo e personalizável com módulos de formas distintas.

5.5.2 Conceito 2 – Painel de revestimento de fachada

O intuito deste conceito passa pela criação de um painel cujo objetivo é revestir fachadas através de módulos, dos quais o componente principal embebido é um espelho.

Neste painel foi introduzido uma nova característica de posicionamento dos módulos, nomeadamente a rotação. Com a possibilidade de inverter a função dos tubos, ou seja, ao invés de utilizar tubos circulares de apoio na vertical e tubos quadrangulares na horizontal para sustentar os módulos, alterou-se a configuração e em conjunto com o elemento de conexão complementar V2 de perfil circular, é possível atribuir rotação aos módulos. Esta particularidade confere uma nova dinâmica aos painéis, o que possibilita criar formas de comunicação.

Na Figura 73 está representado um exemplo de painel espelhado com 2 m de altura e 2 m de largura, constituído por módulos com 30 cm de altura e 20 cm de largura. Nesta configuração foi atribuído um ângulo de rotação aos módulos de 10° , que corresponde ao seu limite máximo. De maneira a contornar esta limitação e aumentar a capacidade rotacional é necessário expandir a extensão do ponto de fixação da moldura.

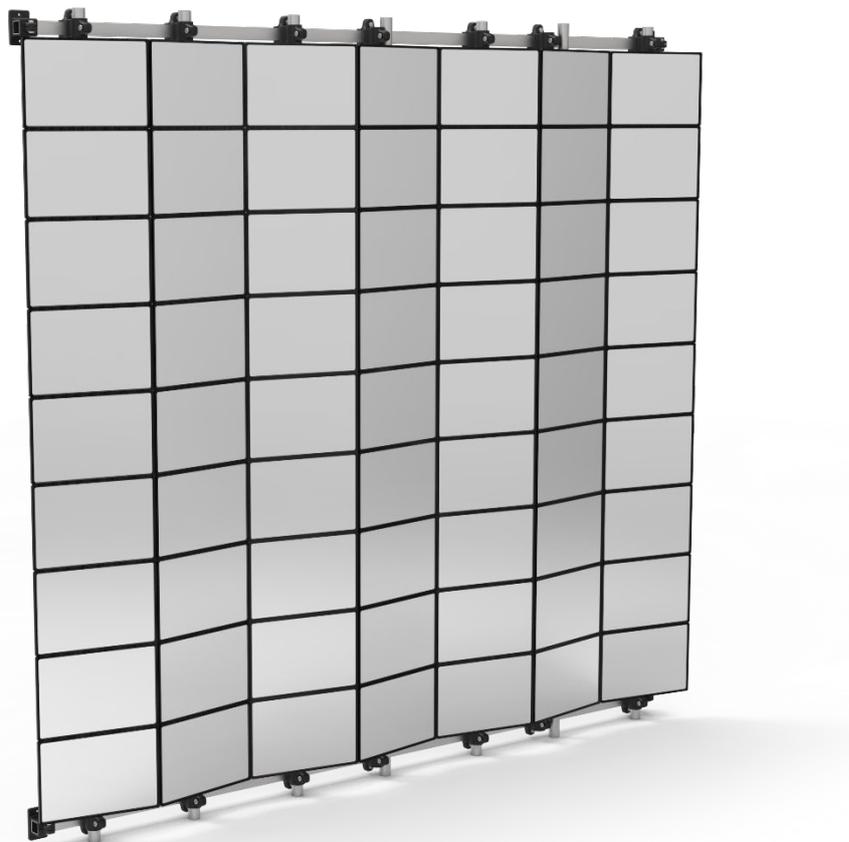


Figura 73 – Painel de revestimento de fachada.

5.5.3 Conceito 3 – Painel acústico modular

O terceiro conceito tem como objetivo a criação de um painel acústico modular, cuja função pode ser alterada consoante a necessidade do utilizador, dependendo do espaço e tipo de acústica desejada, sendo que o painel pode ser modificado, não só através do posicionamento estratégico dos módulos, como também através da substituição dos mesmos.

Os módulos estão divididos em três categorias acústicas distintas, representados na Figura 74, nomeadamente o módulo de absorção (M – 1) composto por uma placa de cortiça, o módulo de difusão (M – 2) constituído por uma placa de madeira com saliências de diferentes alturas e o módulo de reflexão (M – 3) composto por uma placa com núcleo de PVC expandido, revestida com tecido.



Figura 74 – Módulos acústicos.

Cada módulo proporciona um tipo de tratamento acústico distinto e para isso é necessário recorrer a materiais com propriedades diferentes. Dada a natureza dos diferentes materiais é necessário adequar o design da moldura à sua textura e geometria, para tal, no caso das placas com superfícies demasiado porosas e irregulares decidiu-se aplicar uma estratégia de moldura interna.

Esta abordagem consiste em modificar a placa com orifícios de sustentação e adequar a moldura com uma estrutura de apoio e atravancamento, de maneira a envolver a placa (Figura 75). Na Figura 76 está representado um painel acústico de absorção com 1,5 m de altura e 1,5 m de largura, composto por módulos de cortiça com 30 cm altura e 30 cm de largura.

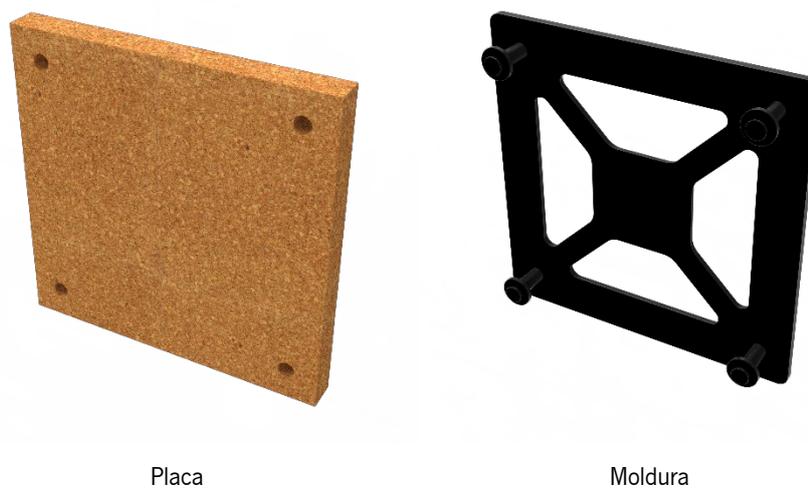


Figura 75 – Módulo de cortiça (pormenor).

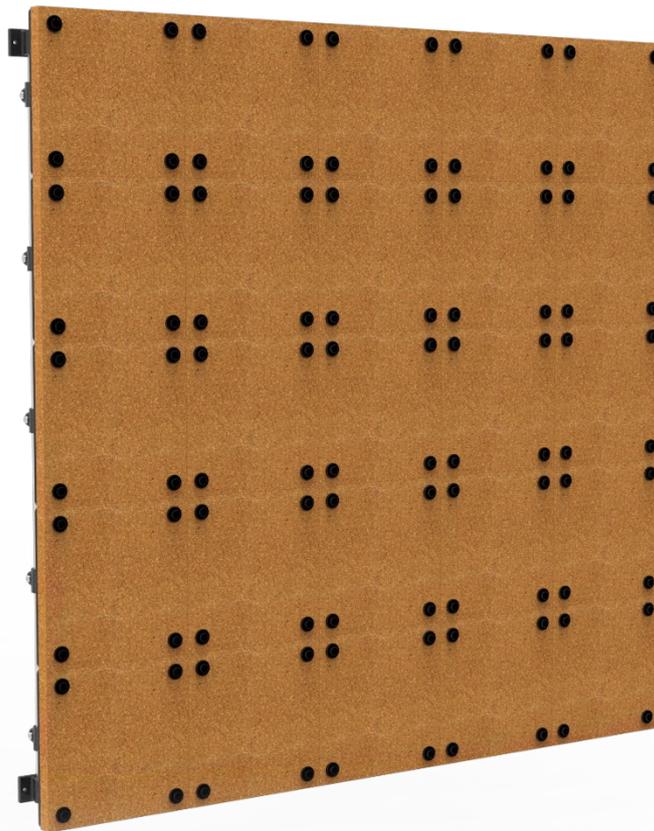


Figura 76 – Painel acústico de absorção.

5.6 Protótipo

Para a realização do protótipo foi necessário selecionar um dos três conceitos desenvolvidos, elegendo-se o conceito de painel comunicativo e personalizável. Dado que o painel conceptualizado seria algo de grande dimensão, optou-se por reduzir o seu tamanho e executou-se apenas a produção de um fragmento do mesmo.

A construção do painel englobou a produção de quatro módulos híbridos, cada um constituído por uma moldura com um azulejo branco (15 cm x 15 cm) e um íman embebidos. Paralelamente foram também produzidos através da tecnologia FDM os quatro elementos complementares V2 de perfil quadrado, com um íman embebido e quatro abraçadeiras cruzadas para realizar a conexão dos tubos (Figura 77). Relativamente à estrutura utilizou-se quatro tubos com 400 mm de comprimento, dois de perfil quadrangular e dois de perfil circular, com 30 mm de diâmetro respetivamente.

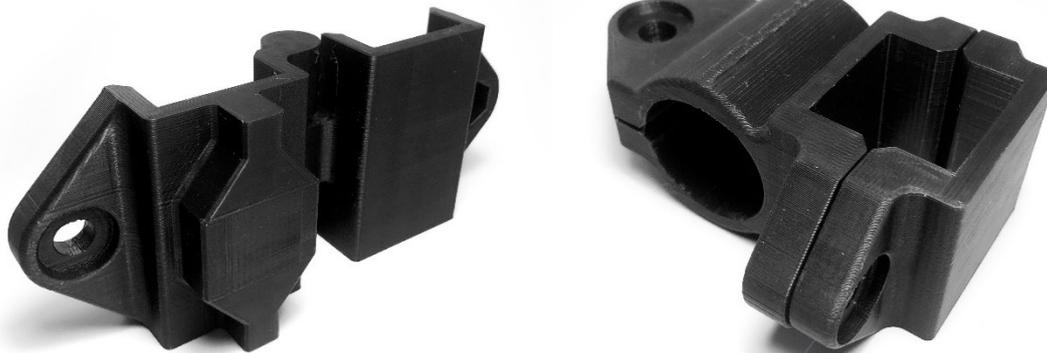
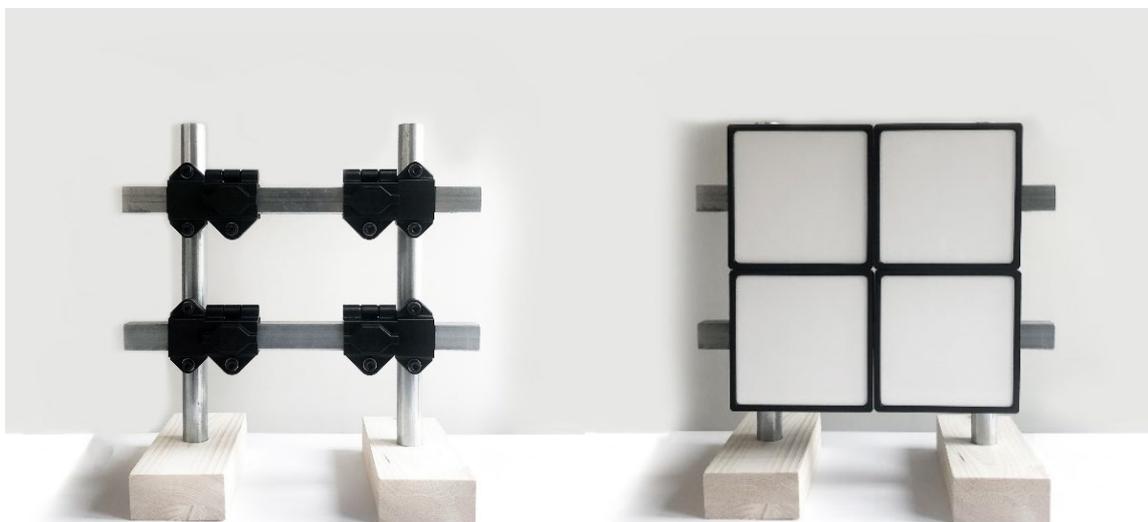


Figura 77 - Elemento complementar V2 e abraçadeira cruzada produzida.

Na Figura 78 está representado o protótipo do fragmento do painel comunicativo e personalizável, composto pelos componentes previamente referidos, onde é demonstrada a estrutura sem módulos e o painel com os módulos fixados.



Estrutura

Painel completo

Figura 78 - Protótipo do painel comunicativo e personalizável (fragmento).

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da presente dissertação teve como objetivo testar diferentes estratégias relacionadas com o processo de embeber componentes externos numa peça ou produto, através da manufatura aditiva (impressão 3D), de modo a entender quais os fatores influenciadores envolventes e perceber quais os métodos mais vantajosos e em que situações os implementar. Adicionalmente, utilizaram-se as práticas desenvolvidas e o conhecimento adquirido na conceção de um produto híbrido produzido através da manufatura aditiva, composto por componentes embebidos.

Com a realização dos testes foi possível compreender que o levantamento dimensional do componente externo em questão é fundamental para um resultado com sucesso, sendo que em caso da utilização de componentes normalizados iguais, é essencial confirmar as dimensões individualmente, pois pode existir uma incoerência entre estas, refletindo-se mais tarde na qualidade do encaixe do componente embebido. Desta forma, constatou-se que para atingir resultados positivos nos processos de embeber componentes, era necessário ter bastante rigor geométrico, a começar pelo levantamento dimensional, a passar pela resolução do ficheiro STL (quando exportado) e a terminar com os parâmetros definidos no *software slicer*.

Para que o componente seja embebido com sucesso é necessário criar cavidades onde são consideradas e implementadas compensações dimensionais, no entanto, para que estas compensações sejam corretamente atribuídas, é fundamental ter em consideração o parâmetro de largura de parede para as dimensões relativas aos eixos X e Y, e altura de camada no caso das dimensões relativas ao eixo Z. As dimensões da altura das cavidades (relativas ao eixo Z) foram as que apresentaram maior adversidade, pois a acumulação de camadas define a altura das cavidades, o que leva à necessidade de encontrar um equilíbrio entre o valor nominal do componente, compensação dimensional e espessura de camada definida no *software slicer*.

Verificou-se que de acordo com a geometria do componente, posicionamento e orientação em que este é embebido pode ser necessário utilizar estruturas de atravancamento internas. As estruturas internas utilizadas no decorrer da execução dos testes, apresentam vantagens que contribuem para conseguir embeber um componente com sucesso. Estas podem desempenhar funções de atravancamento, estabilidade superficial ou ambas em simultâneo com o propósito de bloquear a movimentação indesejada do componente externo no interior da cavidade e garantir um maior rigor dimensional das mesmas, sem que a geometria ou textura/relevo superficial do componente interfira.

Por vezes o processo não depende do atravancamento do componente, mas apenas de uma estabilização superficial da sua textura ou relevo. Neste caso, em comparação com a utilização de cola (PVP), a fixação de uma estrutura de estabilização ao componente revelou-se mais eficaz.

Em situações onde componentes com propriedades magnéticas fortes são embebidos, pode ser essencial fixar o componente na cavidade com cola, para que desta forma este não seja atraído pela cabeça extrusora e se desloque durante as primeiras camadas de revestimento da cavidade.

Relativamente às estruturas de suporte externas utilizadas para sustentar os componentes parcialmente embebidos, em casos mais arrojados ou complexos, esta pode ser modelada manualmente consoante a necessidade ou requisitos do componente, ao invés de gerada automaticamente no *software slicer*. Isto permite não só embeber componentes com maior complexidade geométrica ou em posições/orientações menos vantajosas, como também criar uma estrutura mais robusta que não comprometa a qualidade e função da peça final.

Quanto ao conceito desenvolvido, conclui-se que a utilização desta tecnologia e processo apresentam vantagens relativamente aos processos de fabrico tradicionais, tais como: rapidez de produção; capacidade de produzir em pequena escala, o que contribui para a rentabilidade económica; flexibilidade em transportar o equipamento para produção no local; flexibilidade na produção de geometrias complexas, nomeadamente a capacidade de adaptar ou criar novos módulos a qualquer momento, sem a necessidade de ferramentas de produção (moldes); inexistência de pressões durante o processo de fabrico, o que contribui para a preservação da integridade física do componente principal embebido e possibilidade de utilizar vários materiais com propriedades distintas.

Em relação a investigação futura destaca-se a exploração de materiais com características orgânicas, não só a nível de propriedades, como também a nível de forma ou geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

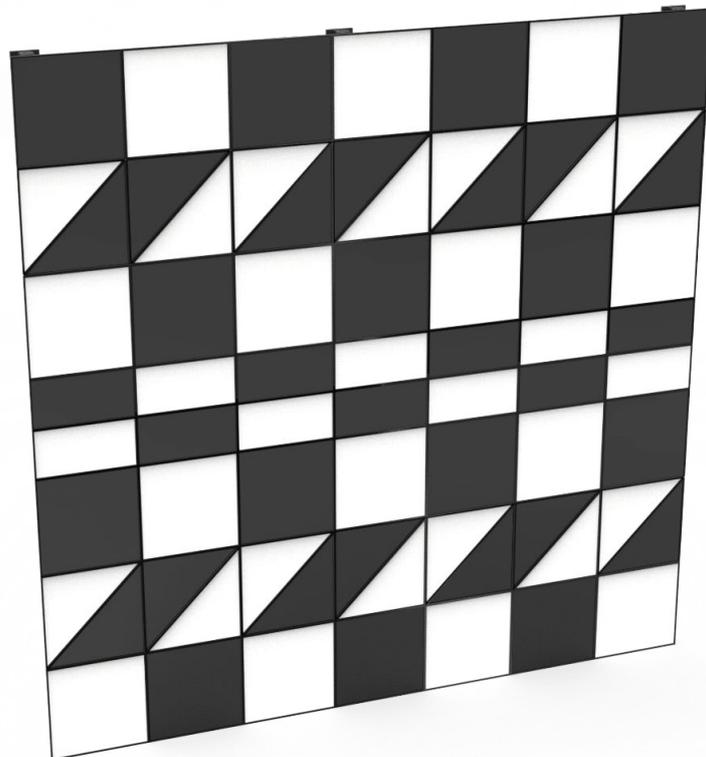
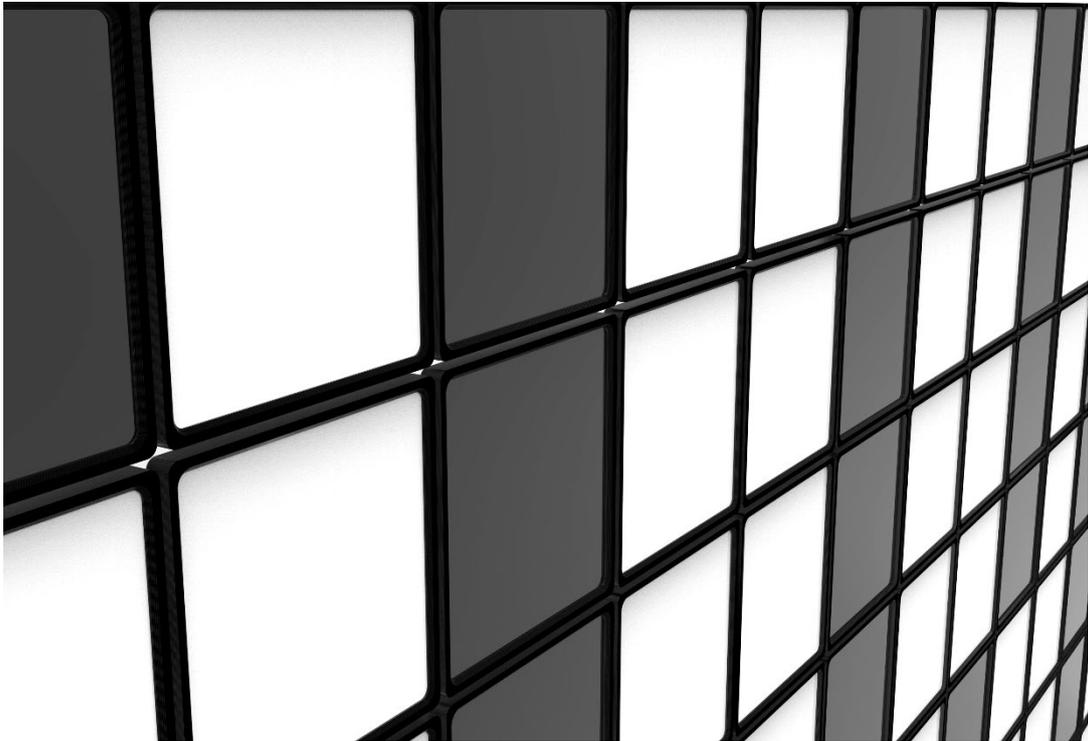
- Filament2print. (2023). Shrinkage of parts in 3D printing and Warping. https://filament2print.com/gb/blog/136_warping-contractions-3D-printing-parts.html
- Kolla, M. (2021, agosto 7). What is the role of Slicing in 3D printing?. Fabheads. <https://fabheads.com/blogs/what-is-the-role-of-slicing-in-3d-printing>
- Leroy Merlin. (s.d.a). 4 fechos de encaixe ZINCADOS. <https://www.leroymerlin.pt/produtos/ferragens/ferragens-para-moveis/fechos-para-moveis/4-fechos-de-encaixe-zincados-13773613.html>
- Leroy Merlin. (s.d.b). Cabide de vassoura removível branco. <https://www.leroymerlin.pt/produtos/arrumacao-e-roupeiros/cabides-charriots-e-bengaleiros/suportes-de-vassoura/cabide-de-vassoura-removivel-branco-84377046.html>
- Lima, A., Silva, C., Sampaio, Á.M., Pontes, A.J. (2017). Development of a methodology for hybrid products during the additive manufacturing process. 4D – Designing, Development, Developing, Design, International Conference. Kaunas University of Technology, Lithuania.
- Markforged. (s.d.a). *Embedding Nuts in 3D Printed Parts for Hidden Fastener Strength*. <https://markforged.com/resources/blog/embedding-nuts-3d-printing>
- Markforged. (s.d.b). *MMF #5: A Guide to Embedding Components in 3D Printed Parts*. <https://markforged.com/resources/blog/embedding-components-in-3d-printed-parts>
- Markforged. (s.d.c). What is Fused Deposition Modeling (FDM)?. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-fused-deposition-modeling-fdm>
- Norelem (s.d.a). Conjuntos de cantoneiras com elementos de fixação Tipo I. <https://norelem.es/pt/Vis%C3%A3o-geral-de-produtos/Sistema-de-montagem/10000/Conectores-para-perfis-de-alum%C3%ADnio/Conjuntos-de-cantoneiras-com-elementos-de-fixa%C3%A7%C3%A3o-Tipo-I/p/agid.17159>
- Norelem (s.d.b). Perfis em alumínio 40x80 leves Tipo I. <https://norelem.es/pt/Vis%C3%A3o-geral-de-produtos/Sistema-de-montagem/10000/Perfis-em-alum%C3%ADnio/Perfis-em-alum%C3%ADnio-40x80-leves-Tipo-I/p/agid.17108>
- Norelem (s.d.c). Sistemas de conexão de tubos. <https://norelem.es/pt/Vis%C3%A3o-geral-de-produtos/Sistemas-e-componentes-para-a-constru%C3%A7%C3%A3o-de-m%C3%A1quinas-e-equipamentos/29000/Sistema-de-conex%C3%A3o-de-tubos/c/21235>

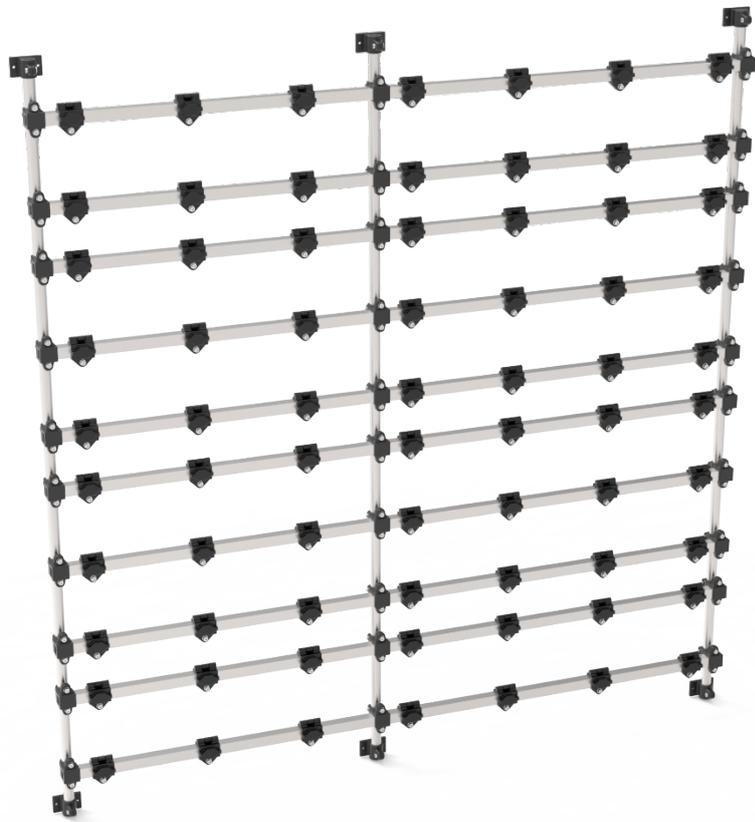
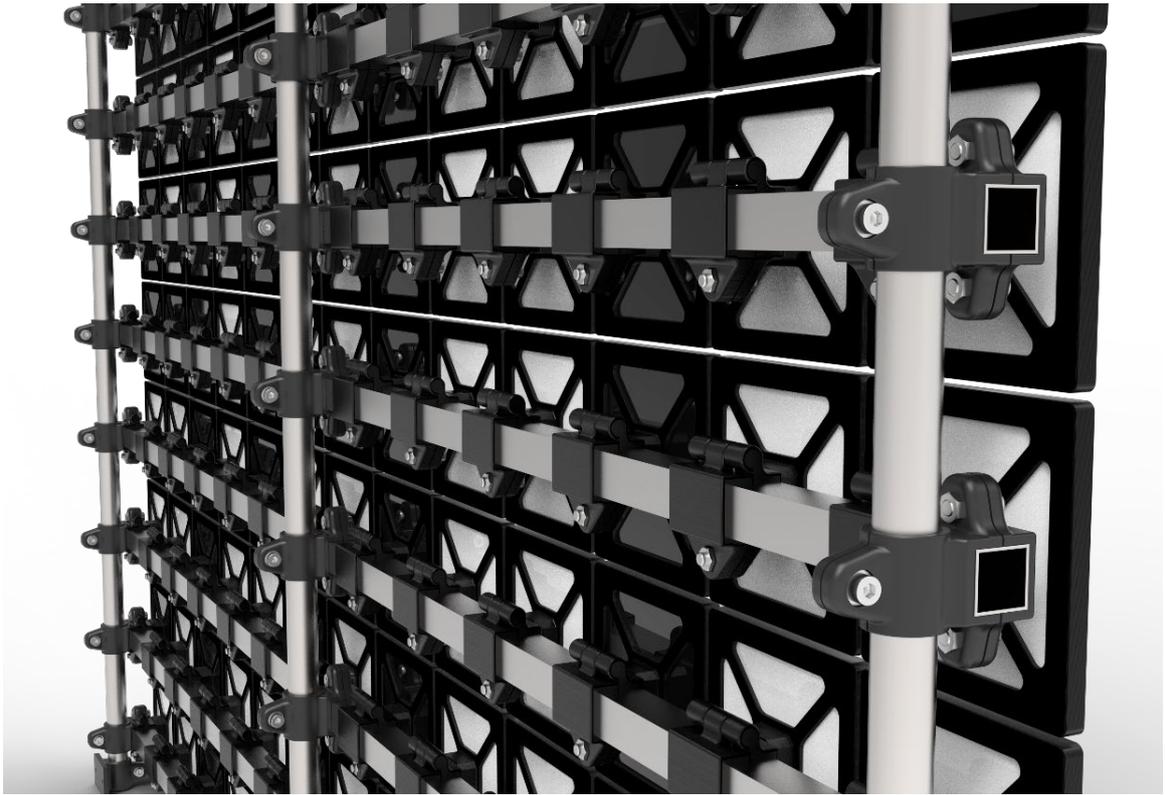
- Quarto, M., Carminati, M., D'Urso, G., Giardini, C., & Maccarini, G. (2021). Processability of metal-filament through polymer FDM machine. 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgique. <http://doi.org/10.25518/esaform21.2114>
- Sampaio, Á.M., Gonçalves, R., Lima, A., Cruz, P.J.S., Figueiredo, B., Carvalho, S., Pontes, A.J. (2020). Design for Additive Manufacturing of Mechanical Connections Toward Hybrid Products. *Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping*. 975, 418-427. http://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_39
- Zhu, Q., Liu, Y., Cai, Y., Wu, M. (2017). Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing. *Proceedings of the 2017 6th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation*. <http://doi.org/10.2991/icmia-17.2017.95>

ANEXOS

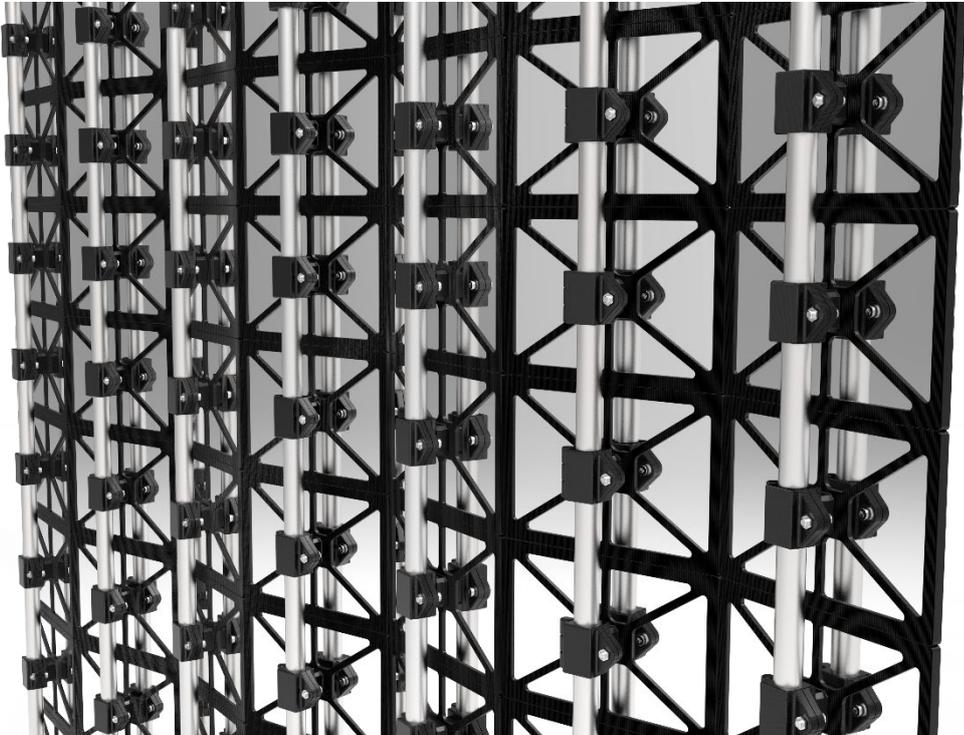
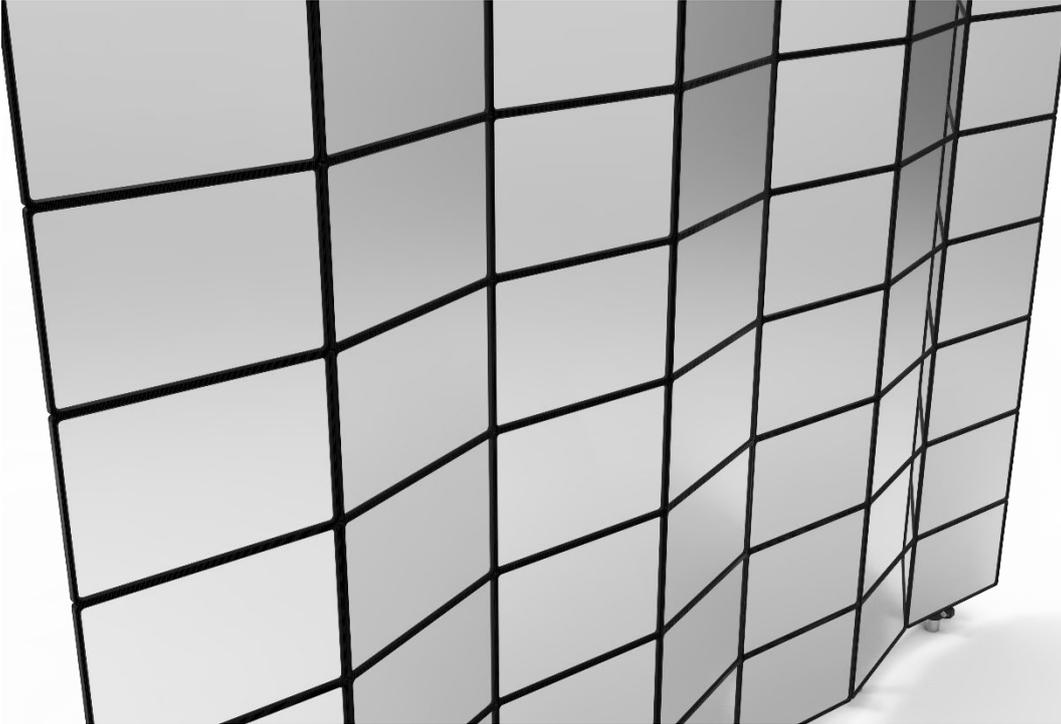
Anexo I – Imagens ilustrativas dos conceitos

Conceito 1 – Painel comunicativo e personalizável

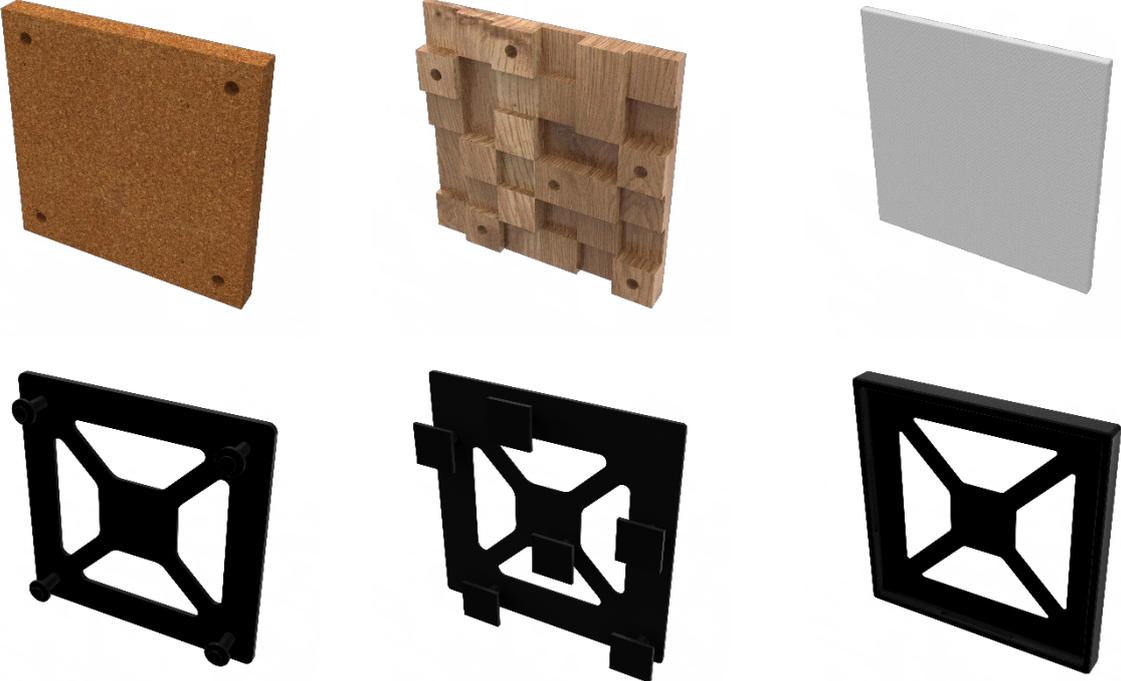


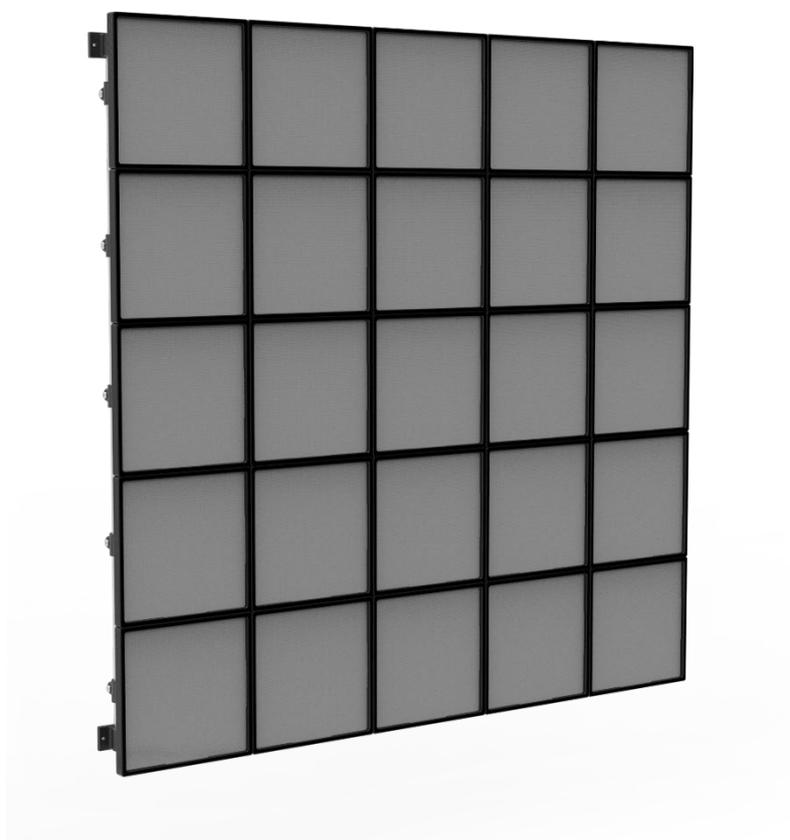
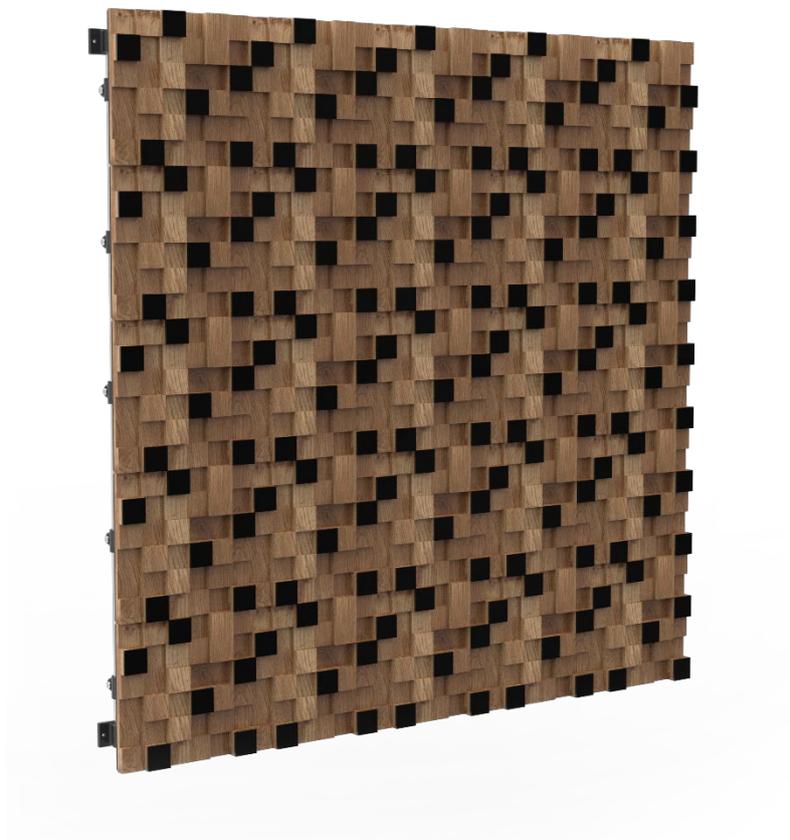


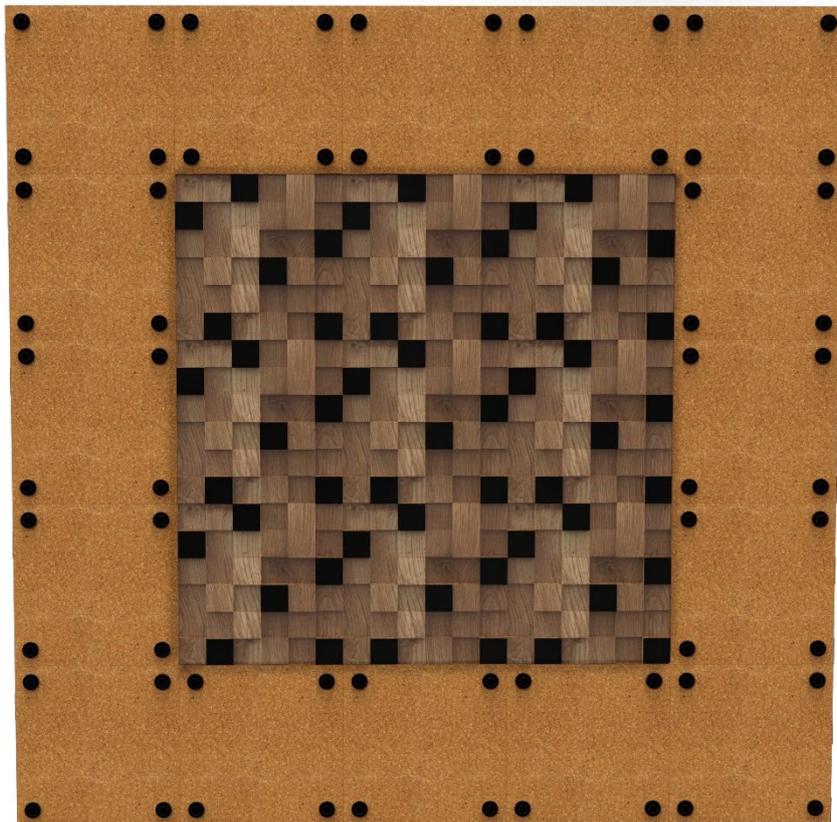
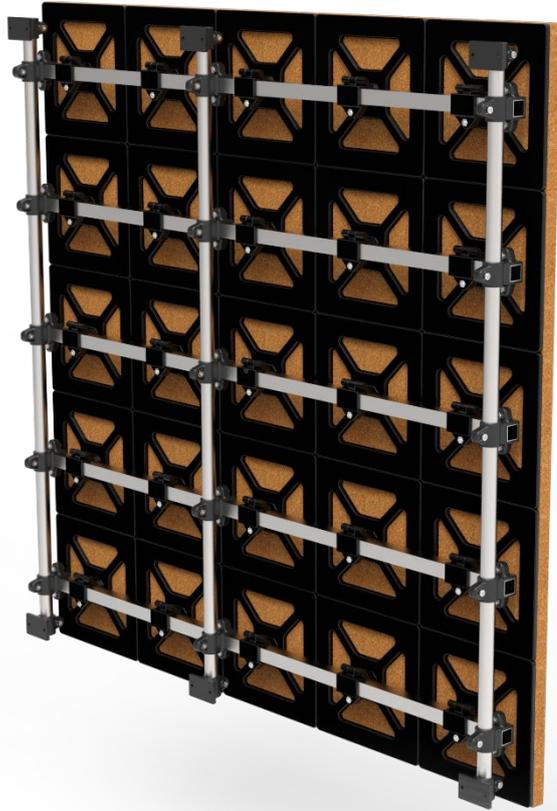
Conceito 2 - Painel de revestimento de fachada



Conceito 3 - Painel acústico modular







Anexo II – Imagens representativas do protótipo

Protótipo – Fragmento do painel comunicativo e personalizável (30x30 mm)



Protótipo - Processo de fabrico e montagem

