U.PORTO

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO

Resíduos de Ardósia na Impressão 3D por extrusão

Vera Inês Coelho Gomes

M
2024

U.PORTO

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutora Lígia Maria Pinto Lopes

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE BELAS ARTES DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutor Jorge Lino Alves

PROFESSOR CATEDRÁTICO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutora Rita de Cassia Mendonça Sales Contini

PROFESSORA TITULAR DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DE CAMPOS (BRASIL)

17

29 OUTUBRO 2024

MESTRE Vera Inês Coelho Gomes
MDIP/**165**

Universidade do Porto
Faculdade de Belas Artes
Faculdade de Engenharia

Orientador: Doutor Jorge Lino
Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto

Coorientador: Doutora Bárbara Rangel
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

Coorientador: Mestre João Teixeira
Estudante de Doutoramento em Engenharia Civil da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, 2024

Resumo

A ardósia, apesar de ser um material que pode ser reaproveitado entre 50% a 70%, é também um material que cria uma quantidade de resíduos considerável e que, no seu processo de extração, desperdiça bastantes recursos naturais.

Seguindo a proposta da Bienal de Valongo, a necessidade da empresa de Lousa de Valongo reduzir substancialmente os resíduos produzidos durante a extração e a iniciativa de explorar novos produtos, desenvolveu-se um novo material que tem como finalidade o reaproveitamento da ardósia, assim como o conhecimento das suas características técnicas.

Para dar uma resposta à proposta exposta, foi seguida uma metodologia que passou pela realização de uma pesquisa teórica baseada na ardósia e nas suas possíveis implementações, seguida da execução de um plano experimental, permitindo a potencialização do resíduo durante a aplicação no material cerâmico. De modo a concretizar a proposta, é criado um plano experimental de reutilização do pó de ardósia, contando com a incorporação de mais resíduos de indústrias (pó de mármore, granito e tijolo). Contando que todo este processo se desenvolve com base na metodologia *Material Driven Design* (MDD), que facilitou a compreensão do material, criou-se um padrão de estudo.

Este plano experimental levou à criação de um novo material que permitiu viabilizar as propriedades do resíduo, que posteriormente foi incorporado na impressão 3D (seguindo parâmetros de avaliação selecionados) para o desenvolvimento de dois módulos (painéis), demonstrando, assim, o papel fundamental do design e o impacto que este pode ter na economia circular.

Este estudo teve um papel determinante na redução de desperdícios do setor industrial, ao mesmo tempo que possibilitou a revelação do potencial de um resíduo aquando da sua incorporação na cerâmica. Além disso, o material (faiança branca, pó de ardósia e mármore) demonstrou ser viável na incorporação dos painéis.

Palavras-chaves: Design; Ardósia: Materiais; Impressão 3D; Cerâmica.

Abstract

Although slate is a material that can be reused between 50% and 70%, it is also a material that creates a considerable amount of waste and which, in its extraction process, wastes a lot of natural resources.

Following the proposal of the Valongo Biennial, the need for the Valongo Slate company to substantially reduce the waste produced during extraction and the initiative to explore new products, a new material was developed with the aim of reusing slate, as well as understanding its technical characteristics.

In order to respond to this proposal, a methodology was followed that included theoretical research based on slate and its possible uses, followed by the implementation of an experimental plan, allowing the waste to be maximised during application in the ceramic material. In order to realise the proposal, an experimental plan was created for the reuse of slate dust, incorporating more industrial waste (marble, granite and brick dust). Since this whole process is based on the Material Driven Design (MDD) methodology, which facilitated understanding of the material, a study pattern was created.

This experimental plan led to the creation of a new material that enabled the properties of the waste to be realised, which was then incorporated into 3D printing (following selected evaluation parameters) for the development of two modules (panels), thus demonstrating the fundamental role of design and the impact it can have on the circular economy.

This study played a decisive role in reducing waste in the industrial sector, while at the same time revealing the potential of a waste product when incorporated into ceramics. In addition, the material (white earthenware, slate powder and marble) proved to be viable for incorporating into the panels.

Keywords: Design; Slate: Materials; 3D printing; Ceramics.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente às pessoas que sempre me acompanharam: à minha mãe, pela força e dedicação que tem dado ao longo vida; à minha irmã e à Fátima, por serem porto seguro nos momentos mais difíceis.

Às minhas amigas, a Sílvia, a Catarina e a Maria Santos, por me terem ajudado nos momentos mais críticos, tornando mais suportáveis as intermináveis noitadas de trabalho, e por me incentivarem a ser sempre a minha melhor versão ao longo do meu percurso.

De seguida, queria agradecer ao meu orientador, Jorge Lino, e coorientadora Bárbara Rangel, por terem aceitado orientar a minha tese. Queria também agradecer ao meu coorientador João Teixeira pela disponibilidade e paciência, na ajuda no processo prático das impressões 3D, auxiliando nos testes de impressão.

Por fim, e não menos importante, queria agradecer às pessoas da Bienal de Valongo, pela proposta do estudo da ardósia e estarem presentes no início do projeto.

Índice

1. Introdução 2

1.1. Enquadramento do tema 2

1.2. Objetivos 3

1.3. Metodologia 3

1.4. Estrutura do documento 4

2. Estado da Arte 8

2.1. Estudo da ardósia 8

2.1.1. Reconhecimento do território e ardósia local 11

2.1.1.1. Método de extração local 13

2.1.2. Resíduos de indústria e o impacto ambiental 15

2.1.3. Pó de ardósia e cerâmica 17

2.1.5. Projetos com ardósia e outros materiais 21

2.1.6. O papel do design na sustentabilidade 24

2.1.6.1. Material Driven Design 24

2.2. Impressão 3D 25

2.2.1. Fabrico aditivo 26

2.2.2. Impressão 3D em cerâmica 27

2.2.3. Sustentabilidade na impressão 3D 30

2.4. Pesquisa de mercado 31

3. Caso de Estudo 48

3.1. Plano experimental 49

3.1.1. Etapa 01 – compreender os materiais 50

3.1.1.1. Cerâmica – Faiança 51

3.1.1.2. Pó de ardósia 51

3.1.1.4. Desperdício industrial 52
3.1.1.5. Matérias-primas convencionais 53
3.1.2. Etapa 02 – Estudo do material 55
3.1.3. Ensaios da Etapa 02 59
3.1.3.1. Composição base (Faiança + ardósia + monocol v) 59
3.1.4. Etapa 03 – Processo de comportamento térmico 67
3.1.5. Etapa 04 – Calibração 73
4. Desenvolvimento e impressão do produto 78
4.1. Trilobites fossilizadas 79
4.2. Trans-Matéria 81
4.3. Fachadas 83
4.4. Jardim Vertical 84
4.2. Desenvolvimento do produto 86
4.2.1. Considerações 86
4.2.2. Aplicação do conceito 89
4.2.3. Desenvolvimento dos módulos 91
4.2.4. Aplicação das texturas nos módulos 92
4.5. Testes de usabilidade do produto 94
4.6. Alterações finais 99
4.6.1 Testes de usabilidade módulo A 99
4.6.2. Processo de cozedura do módulo A 102
4.7. Produto final 104
5. Conclusão 110
5.1. Constrangimentos 111
5.2. Desenvolvimentos futuros 111

Lista de figuras

Figura 1: Distribuição dos centros de produção Fonte: Autora

Figura 2: Ardósia metamórfica Fonte:https://valongoslate.pai.pt/

Figura 3: Xisto sedimentar Fonte: https://www.brispedra.com/produto/gravilha-xisto-preto-2/

Figura 4: Ardósia de Valongo; Ardósia de Arouca; Ardósia de Mondim de Basto;

Ardósia de Foz Côa Fonte: Leal, 2017

Figura 5: Habitações dos operários Fonte: https://www.cm-valongo.pt/thumbs/cmvalongo/uploads/poi/image/10/museu_ lousa_1_1024_2500.jpg

Figura 6: Esquema dos poços. Fonte: Leite & Guedes, 2022, desenhado pela autora.

Figura 7: Processo da extração a Céu-Aberto Fonte: Adaptado pela autora de gráfico de Beatriz Olaio Morais Alves, n.d.; Leite & Guedes, 2022

Figura 8: Telhas de ardósia para cobrir monumentos históricos Fonte: https://www. studiomixtura.com/geo-slate

Figura 9: Slatetec de diferentes formas e diferentes texturas Fonte: https://www.publico. pt/2018/04/16/p3/noticia/dos-restos-em-po-da-ardosia-criouse-um-novo-material-sustentavel-1833320

Figura 10: Amostra de Resíduo mineral Fonte: https://green. fibrenamics.com/modelos-demonstradores-mineral

Figura 11: Metodologia Material Driven Design (MDD) Fonte: Karana, Barati, Rognoli, & van der Laan, 2015 desenhado pela autora

Figura 12: Processo de prototipagem rápida. Fonte: Adaptado pela autora de gráfico de Prakash, 2017 e Neto, 2021

Figura 13: Vasos de artesãos impressos em 3D. Fonte: https://oliviervanherpt.com/about/

Figura 14: Sediment, diferentes tonalidades de cor colocadas por camadas Fonte: https://oliviervanherpt. com/sediment/

Figura 15: Objeto tecido com reintrodução do erro humano, 2013. Fonte: https://oliviervanherpt. com/3d-printing-ceramics/

Figura 16: Técnicas tradicionais de tecelagem de tapetes (Kilim). Fonte: https://www.3dwasp. com/vasi-in-argilla-stampati-in-3d-da-drag-and-drop/

Figura 17: Textura tricotada (Bulky). Fonte: https://www.3dwasp. com/vasi-in-

argilla-stampati-in-3d-da-drag-and-drop/

Figura 18: Botões de flores (Sépalas). Fonte: https://draganddrop. design/collections/3d-printed-ceramic-vases

Figura 19: Material inspirado na natureza (Rosebud). Fonte: https://www.3dwasp. com/mobili-e-prodotti-di-design-stampati-in-3d-in-ceramica-con-keramik/

Figura 20: Taça com variedades tons, devido a variedades temperaturas. Fonte: http://unfold.be/pages/bokrijk-ware.htm

Figura 21: TECLA. Fonte: https://www. archdaily.com.br/br/960943/casa-impressa-em-3d-com-tecnologia-tecla-mario-cucinella-architects?ad_source=search&ad_ medium=projects_tab

Figura 22: TOVA. Fonte: https://images. adsttc.com/media/images/631f/4370/115d/8a49/dc8a/73fb/medium_jpg/casa-e-impressa-com-terra-babosa-e-clara-de-ovo-em-sete-semanas_3.jpg?1662993272

Figura 23: Linha de candeeiros paramétrico e algoritmos Fonte: https://coudre.studio/projects/reprint-ceramics/

Figura 24: Cerâmica reciclada de 5 e 10% de Remake Ceramics Fonte: https://materialdistrict. com/material/remake-ceramics/

Figura 25: Colunas estruturais impressos Fonte: https://www.dezeen. com/2023/07/31/dart-lab-biodegradable-concrete-casting-sawdust/

Figura 26: Protótipo 1:1 Fonte: https://parametric-architecture.com/3d-printed-earth-wall-with-embedded-staircase-wasp-iaac/

Figura 27: Azulejos New Delft Blue Fonte: https://amazingarchitecture.com/storage/files/1/architecture-firms/studio-rap/new-delft-blue/new-delft-blue-studio-rap-netherlands-18.jpeg

Figura 28: Azulejos em três tons de vermelho e dois tipos de fachada Fonte: https://www.dezeen. com/2023/11/29/rap-studio-3d-printed-ceramic-tiles-facade-rippling-textile/

Figura 29: Azulejo com estrutura de metal e suporte de plantas Fonte: https://emergingobjects. co m/pro j e ct/se ed -sti tch /; https://emergingobjects.com/wp-content/uploads/2018/03/Rael_San_Fratello-3D_Printed_ Cabin-C0920.jpg

Figura 30: Textura laminada e artesanal na parede lateral Fonte: https://parametric-architecture.com/3d-printed-concrete-book-cabin-exposed-by-professor-xu-weiguos-team/?__cf_chl_

Figura 31: Potencial da impressora de cerâmica Fonte: https://www.alterfact.net/elaboration

Figura 32: Esquema representativo dos materiais de utilização. Fonte: Autora,

2024.

Figura 33: Propriedades da faiança. Fonte: Autora, 2024.

Figura 34: Pó de ardósia. Fonte: https://pt.made-in-china. com/co_njpurda/product_Ral-7015-Slate-Grey-Powder-Coating-Powder_rrgyssssg.html

Figura 35: Esquema representativo do resíduo industrial. Fonte: Autora, 2024.

Figura 36: Esquema representativo dos materiais de utilização Fonte: Autora, 2024.

Figura 37: Casca de ovo Fonte: Autora, 2024.

Figura 38: Casca de arroz Fonte: Autora, 2024.

Figura 39: Primeira etapa da preparação das misturas Fonte: Autora, 2024.

Figura 40: Segunda etapa do ensaio da retração em estado “verde” Fonte: Autora, 2024.

Figura 41: Terceira etapa do ensaio de capacidade de extrusão Fonte: Autora, 2024.

Figura 42: Quarta etapa do ensaio de capacidade de construção Fonte: Autora, 2024.

Figura 43: Fatores que influenciam a impressão Fonte: (Teixeira et al., 2018). Desenhado pela autora.

Figura 44: Amostras realizadas no Anteprojeto Fonte: Autora

Figura 45: Amostra A11 Fonte: Autora

Figura 46: Amostras B Fonte: Autora

Figura 47: Pormenor do filamento das amostras B Fonte: Autora

Figura 48: Reações da cozedura da pasta cerâmica Fonte: M. H. Canotilho, 2003. Desenhado pela autora

Figura 49: Temperatura de 1180ºC Fonte: Autora

Figura 50: Moodboard do plano experimental do Anteprojeto Fonte: Autora

Figura 51: Temperaturas de 950ºC e 1050ºC Fonte: Autora

Figura 52: Amostras expostas a temperaturas de 950ºC e 1050ºC Fonte: Autora

Figura 53: Amostra com reação de desintegração Fonte: Autora

Figura 54: Amostras C Fonte: Autora

Figura 55: Teste de calibração com bocal de 6mm Fonte: Autora

Figura 56: Modelo pré-definido em estado “verde” Fonte: Autora

Figura 57: Pormenor do modelo pré-definido em estado “verde” Fonte: Autora

Figura 58: Principais caraterísticas de trilobites. Fonte: Adaptado pela autora de imagem de Caprichoso, 2019

Figura 59: Evolução convergente por carateres morfológicos Fonte: Adaptado

pela autora de imagem de (Hopkins, 2017).

Figura 60: Áreas de trilobites em Portugal Fonte: Adaptado pela autora de gráfico de (Caprichoso, 2019).

Figura 61: Interação do utilizador com o produto Fonte: Adaptado pela autora de gráfico de (Ribeiro, 2015).

Figura 62: Funcionamento da caixa de ar Fonte: (Silvia, 2015). desenhado pela autora

Figura 63: Sistema de suporte: A sistema visível e B sistema invisível Fonte: (Silvia, 2015). desenhado pela autora

Figura 64: Classificação das paredes verdes Fonte: Adaptado pela autora de gráfico de (Manso & Castro-Gomes, 2015).

Figura 65: Jardins verticais Fonte: Compilação autora - do https://www.archdaily.com/

Figura 66: Brainstorming de restrições Fonte: Autora, 2024.;

Figura 67: Brainstorming de restrições do painel exterior Fonte: Autora, 2024.

Figura 68: Brainstorming de restrições do painel interior Fonte: Autora

Figura 69: exturas das trilobites, ardósia e areia. Fonte: Compilação da autora.

Figura 70: Painéis verticais em impressão 3D Compilação da autora

Figura 71: Sketch´s Fonte: Autora

Figura 72: Testes de impressão em PLA Fonte: Autora

Figura 73: Padrão para o modelo 3D. Fonte: Autora

Figura 74: Aplicação da textura - areia no modelo 3D. Fonte: Autora

Figura 75: Modelação da versão inicial para a final. Fonte: Autora

Figura 76: Primeiras camadas: do módulo A. Fonte: Autora

Figura 77: Primeiras camadas: do módulo B. Fonte: Autora

Figura 78: Primeiras camadas: do módulo A. Fonte: Autora

Figura 79: Primeiras camadas: do módulo B. Fonte: Autora

Figura 80: Consequências do ângulo acentuado do painel A Fonte: Autora

Figura 81: Consequências do ângulo acentuado do painel B Fonte: Autora

Figura 82: Módulo B cozido a temperatura de 1050ºC Fonte: Autora

Figura 83: Módulo B vista superior Fonte: Autora

Figura 84: Pormenor do módulo B Fonte: Autora

Figura 85: Modelação Rhino da segunda versão do módulo A Fonte: Autora

Figura 86: Constrangimento do protótipo no módulo A Fonte: Autora

Figura 87: Pormenor do constrangimento do protótipo no módulo A Fonte: Autora

Figura 88: Modelação do módulo A final Fonte: Autora

Figura 89: Protótipo do módulo A Fonte: Autora

Figura 90: Protótipo do módulo A na vista “lateral”. Fonte: Autora

Figura 91: Duas partes do módulo A. Fonte: Autora

Figura 92: Peça frontal cozida a 1050ºC. Fonte: Autora

Figura 93: Peça em perspetiva cozida a 1050ºC. Fonte: Autora

Figura 94: Peça a uma temperatura de 1180ºC . Fonte: Autora

Figura 95: Módulo A final. Fonte: Autora

Figura 96: Módulo B final. Fonte: Autora

Figura 97: Versatilidade na modulação dos módulos. Fonte: Autora

Figura 98: Fácil modulação pelo utilizador. Fonte: Autora

Figura 99: Junção do módulos com plantas. Fonte: Autora

Figura 100: Jardim vertical Fonte: Autora

Figura 101: Desenho de suportes invisíveis Fonte: Autora

Figura 102: Junção dos módulos com plantas Fonte: Autora

Figura 103: Painel aplicado no interior Fonte: Autora

Figura 104: Painel aplicado no exterior Fonte: Autora

Índice de tabelas

Tabela 1: Síntese dos estudos de pó de ardósia e cerâmica.

Tabela 2: Síntese de caso de estudo de resíduos aplicados em Impressão 3D

Tabela 3: Síntese de caso de estudo do material cerâmico em impressão 3D

Tabela 4: Composição de amostra base.

Tabela 5: Composição base com resíduo de tijolo.

Tabela 6: Composição base com resíduo de granito e tijolo.

Tabela 7: Composição base com resíduo de mármore e tijolo.

Tabela 8: Composição base com resíduo borra de café com resíduo industrial

Tabela 9: Composição base com resíduos convencionais.

Tabela 10: Retração linear das amostras cerâmicas.

Abreviaturas e simbolos

3DP – 3D Printing

CAD – Computer Aided-Design

CO_2 – Dióxido de carbono

ELV – Empresa Lousa de Valongo

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LFC – Laboratório de Física das Construções

MDD – Material Driven Design

SL ou **SLA** – Estereolitografia ou Stereolithographic

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

O tema da tese, “Resíduos de Ardósia na Impressão 3D por extrusão”, surge com a resposta à reutilização do pó de ardósia, requerida na empresa da Lousa de Valongo. Em um contexto de estudo que provém de um seminário das Residências Artísticas e Tecnológicas GroundLAB, no âmbito da III Bienal de Ardósia de Valongo, com uma iniciação em 30 de junho. Na análise desse projeto, deparou-se com a parte histórica do material e o impacto dos resíduos.

Após a Bienal e de uma visita à empresa da Lousa de Valongo, a viabilidade do material foi questionada, bem como o interesse de dar à ardósia um novo propósito. Trata-se de um material que gera uma quantidade considerável de resíduos na indústria. O processo de extração leva ao desperdício de recursos naturais, pela necessidade de extrair em grandes quantidades que acabam por não ser devidamente valorizadas (Alves, 2021). A produção de ardósia em Portugal aumentou de 51.596 toneladas em 2020 (DGEG, 2021) para 80.483 toneladas em 2021 (DGEG, 2022), representando um aumento considerável na extração e potencial geração de resíduos. Com esse crescimento da indústria, resultará também num aumento da quantidade de resíduos produzidos, aumentando assim o potencial de impacto ambiental. A reutilização destes resíduos reduz a necessidade de deposição em aterro e optimiza a utilização de um recurso que já existe (Sobral, 2020b). A necessidade das empresas de extração de ardósia de Valongo em investir e explorar novos produtos, apenas de ardósia, ou em combinação com outros materiais, foi vista como uma oportunidade para fazer face à quantidade substancial de resíduos de ardósia produzidos. Essa viabilização ocorre através do *design*, permitindo a valorização desses resíduos, criando assim, produtos de maior valor agregado.

Toda esta problemática deixa em questão o contributo do designer e sua intervenção face à questão da sustentabilidade e da economia circular. Além disso, como poderia entrevir de forma benéfica na reutilização desse desperdício. A impressão 3D ou fabrico aditivo é uma técnica que apresenta desperdícios quase nulos, que permite uma solução mais sustentável na criação de objetos complexos. No caso de materiais cerâmicos, o processo utiliza apenas o material necessário e permite reaproveitar excedentes, minimizando ainda mais os resíduos. Para além disso, esta tecnologia permite, em termos de customização em massa, redução no tempo de construção, redução de mão de obra e de resíduos. Tirando partido dessa tecnologia e de um design inovador, existe uma oportunidade única de reutilizar o pó de ardósia na criação de material cerâmico para impressão 3D (Robayo-Salazar et al., 2023). Este facto

não só valoriza o material, como também contribui para a criação de produtos ecológicos, promovendo práticas sustentáveis ao longo de todo o processo de produção.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação prende-se com o desenvolvimento de um material experimental resultante do reaproveitamento de desperdícios de indústria, mais precisamente, os resíduos de ardósia obtidos na empresa das Lousas de Valongo. Além disso, de forma a realçar os princípios da economia circular, pretende-se:

- Estudar e desenvolver materiais (cerâmica para impressão 3D) com aproveitamento de desperdícios de indústria;
- Desenvolver um material cerâmico composto por ligantes e pó de ardósia que satisfaça os critérios de avaliação (requisitos técnicos) e ambientais;
- Promover a (re)utilização de resíduos como materiais primários em cerâmica;
- Proporcionar uma aplicação para os materiais em um ou mais produtos, com base na investigação efetuada.

Tendo em conta os objectivos gerais acima referidos, foram estabelecidos os seguintes princípios: valorizar os resíduos de pó de ardósia através da impressão 3D; analisar a própria ardósia, o seu impacto e tirar partido das suas propriedades e da sua história; realizar uma análise crítica dos resultados dos planos experimentais, com base numa metodologia estruturada que inclui várias fases de desenvolvimento; com base no estudo, serão desenvolvidos módulos para a criação de um painel a partir do material selecionado no plano experimental; analisar a usabilidade do material com base de ensaios de extrusão; analisar e refletir os resultados alcançados de forma desenvolver melhorias futuras.

1.3. Metodologia

A presente dissertação é dividida em 3 grandes partes: a primeira, referente à pesquisa bibliográfica e o estado de arte; a segunda, relacionada ao estudo experimental; e a terceira, relativa à criação de um ou mais produtos, baseado no estudo experimental.

No primeiro momento, foi realizada uma pesquisa teórica, com base em dados científicos resultantes de pesquisas online, livros e artigos académicos, com foco nos seguintes temas: problemas originados pelos resíduos de ardósia e o seu pó, com base no conceito da economia circular; Pesquisa e estudo do mercado, referente à implementação de ardósia em produtos e materiais cerâmicos.
O segundo momento, baseado na investigação teórica anteriormente

realizada, proporcionou a viabilidade do caso de estudo. Nesta fase, realizou-se um estudo experimental baseado na conceção de misturas com um material base (pó de ardósia) e vários desperdícios, permitindo assim avaliar o pó de ardósia e o seu potencial na criação de um material para impressão 3D. Com o objetivo de melhorar a análise das amostras e potencializar aplicação do material foi selecionado o método MDD (*Material Driven Design*). Este método facilitou a compreensão dos materiais numa perspetiva técnica e experimental, criando um padrão de estudo e fases de forma a ser benéfico no desenvolvimento dos materiais. Ainda nesta fase, após encontrado um material que respondesse aos critérios de avaliação, foi realizado um estudo de impressão, tendo como base um modelo pré-definido. Isto permitiu visualizar o comportamento do material na impressão ao avaliar a qualidade do cordão extrudido.

Num terceiro momento, devido ao método MDD, foi possível entender os materiais, numa perspetiva técnica e experimental. O processo permitiu a aplicação do material analisado no estudo de caso à impressora 3D, facilitando assim o desenvolvimento do conceito e a criação de vários módulos aplicados à arquitetura.

1.4. Estrutura do documento

A dissertação está estruturada em cinco capítulos: Introdução, Estado da Arte, Caso de Estudo, Desenvolvimento do conceito e produto, e Conclusão.

O primeiro capítulo, Introdução, introduz a temática do reaproveitamento de desperdício (contexto, pertinência do estudo e o problema); os objetivos gerais e específicos; metodologias adotadas; e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo consta de uma revisão bibliográfica, onde se abordam o papel do design e o conceito da economia circular. É efetuado um estudo do material em causa (ardósia), analisando as suas propriedades e o seu contexto histórico e o local da recolha do resíduo. Essa abordagem dos resíduos leva ao tema da sua extração que, por sua vez, permite defender a pertinência deste estudo. Para além disso, é investigados projetos no mercado – Matérias com implementação de ardósia, são materiais cerâmicos e impressão 3D.

O terceiro capítulo é relativo ao caso de estudo, no qual são introduzidos: a metodologia MDD (*Material Driven Design*) no plano experimental; os resultados alcançar; análise dos resultados baseada nos critérios de avaliação necessários para a impressão do material.

No quarto capítulo, o material selecionado no caso de estudo é aplicado à impressora 3D, com o objetivo de analisar a sua viabilidade. O conceito e as suas inspirações serão abordados e aplicados num produto. Em seguida, são efetuados testes de usabilidade do produto e do material na impressora.

No quinto capítulo apresenta-se uma conclusão que dá uma possível resposta ao problema colocado, com uma argumentação dos resultados alcançados, bem como os seus contributos na temática. Além disso, aborda os constrangimentos do processo e a possibilidade de desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2. Estado da Arte

Neste capítulo faz-se uma revisão bibliográfica, onde se analisa a ardósia, a impressão 3D, o design e a sustentabilidade, bem como os seus casos de estudo, refentes ao tema desta tese.

Num primeiro momento, o foco é a ardósia. O interesse neste material surgiu com a participação na III Bienal de Ardósia de Valongo. Inicialmente, é dado especial foco à ardósia, com a enumeração das suas características e o reconhecimento do local da ardósia como resíduo base. De seguida, é referido o método de extração do local e o impacto ambiental dos resíduos de indústria, por consequência dos resíduos da indústria. De forma a demonstrar viabilidade na incorporação desses resíduos, são apresentados estudos e produtos de ardósia, cerâmica e outros materiais, como uma solução da reutilização dos resíduos, que levanta a questão de saber qual o papel do design na sustentabilidade e como é que este pode influenciar o impacto ambiental.

No tema da impressão 3D, são abordados os princípios básicos, a sua definição, características e benefícios. Para além disso, é incluída uma abordagem aos princípios básicos da fabricação aditiva, a classificação dos materiais, as técnicas e as suas aplicações. Mencionam-se os parâmetros do material necessários para realizar uma impressão e o processo industrial do material. De seguida, reforça-se a análise da sustentabilidade na impressão, como uma vantagem acrescida.

Por fim, é realizada uma pesquisa de mercado, através da qual são recolhidos e analisados dados representativos para informar e facilitar a tomada de decisões em relação ao projeto. Os projetos incluirão exemplos de técnicas de impressão 3D, matérias base, métodos e a utilização de resíduos com propósitos diferentes.

2.1. Estudo da ardósia

Este subcapítulo tem como foco a ardósia, concretamente as suas caraterísticas, sendo analisados os processos de extração, os impactos e as possíveis soluções para os resíduos gerados, permitindo a reutilização do material.

As rochas metamórficas ou ornamentais, como a ardósia e o xisto (foliadas), ou o mármore (não foliadas), são classificadas com base na textura e composição química. O seu grau de metamorfismo é determinado pelos níveis de pressão e temperatura durante a formação, correspondendo os graus mais baixos a níveis mais baixos de pressão e

temperatura (Leal, 2017). As pedras naturais são compostas pelo grupo dos granitos, mármores e ardósia. A ardósia possui, em Portugal, uma granulometria fina, maioritariamente composta por moscovite, clorite, hematite e pirite (Alves, 2021). Este tipo de rochas é explorado pelas suas características específicas, tais como: dureza média; baixa porosidade; alta resistência mecânica; e uma composição mineralógica que permitem a sua ampla utilização como revestimento. São usadas em diversas aplicações na construção civil, na arquitetura e no design de interiores, devido aos seus atributos estéticos, durabilidade dos revestimentos, facilidade de manutenção e limpeza (Leal, 2017). A ardósia em Portugal difere daquilo que se encontra fora do país, pois aqui o material tem um caráter estruturalmente vantajoso, tais como a durabilidade, resistência ao desgaste e altamente impermeáveis (Ardósia Portuguesa Do Fabricante, 2022). Constituida mariotariamente por uma composição química de quartzo (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematite (Fe_2O_3), que permite classificar sua durabilidade e a distinção entre variedades semelhantes através da análise destes elementos (Alves, 2021).

As características estéticas e físicas, mecânicas e de durabilidade são uma das vantagens das pedras ornamentais – pedras naturais que são cortadas e polidas – que são influenciadas pela localidade onde se encontram em Portugal. A ardósia é um material que se encontra em zonas como Valongo, Arouca, Vila Nova de Foz Côa. Num relatório publicado pela DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia), foi revelado que a produção de pedra natural à escala nacional e regional atingiu proporções consideráveis no ano 2000 (Rochas Ornamentais e Industriais Portuguesas, 2022).

Figura 1: *Distribuição dos centros de produção*
Fonte: *Autora*

Figura 2: *Ardósia metamórfica*
Fonte:https://valongoslate.pai.pt/

Figura 3: *Xisto sedimentar*
Fonte: https://www.brispedra.com/produto/gravilha-xisto-preto-2/

Em Portugal, a ardósia e a sua produção enfrentam a concorrência significativa da cerâmica, que é produzida em grandes quantidades ao longo de todo o litoral, de Espinho a Tomar, passando por Lisboa e pela Península de Setúbal. A cerâmica tem registado uma evolução significativa e continua a ser muito abundante em Portugal, onde é muito utilizada na construção civil. A ardósia, apesar de não ter um mercado interno significativo, representa 95% das exportações portuguesas para a Europa (Portas, 2018).

A ardósia, em Portugal, como se representa na figura 1, encontra-se nos concelhos de Valongo (xisto de cor cinzento-azulado a cinzento-escuro e de clivagem xistenta nítida), Arouca e Mondim de Basto (Alves, 2021). Uma rocha metamórfica (figura 2) homogénea, foliada, derivada de xistos argilosos sedimentares ou de cinzas vulcânicas que sofreram um baixo grau de metamorfismo. Esta baixa intensidade de metamorfismo permite-lhe distinguir-se das rochas de xisto (figura 3), que apresentam foliações mais acentuadas (Ardósia Vs Xisto , sd). A rocha (ardósia) é submetida a baixas pressões e temperaturas de modo a criar planos laminados finos e paralelos, que facilitam a identificação e a fracturação da rocha. Além disso, a cor também serve como meio de identificação (figura 4). Apresentam cores que vão de tonalidades cinzento ao avermelhado, com granulometria fina, o que permite verificar os planos de corte para a foliação ao longo dos seus planos naturais sem a necessidade de ferramentas de corte tradicional (Alves, 2021). Já a ardósia que se encontra no concelho de Vila Nova de Foz Côa, apresenta características diferentes, com um grau de metamorfismo ligeiramente maior, que se pode demonstrar com brilho e ondulação.

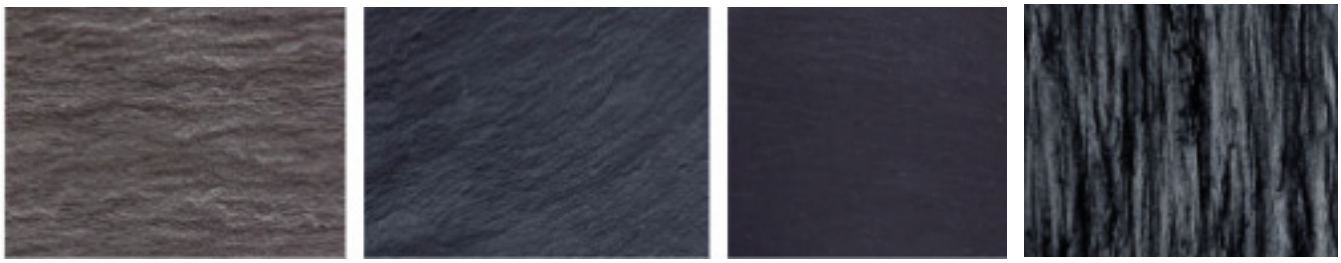


Figura 4: *Ardósia de Valongo; Ardósia de Arouca; Ardósia de Mondim de Basto; Ardósia de Foz Côa*
Fonte: Leal, 2017

A ardósia mais predominante a nível nacional e internacional, encontra-se na região de Valongo, onde também tem mais extração devido às suas características (durabilidade e resistência) e propriedades estéticas (Rochas Ornamentais e Industriais Portuguesas, 2022). É uma rocha sedimentar e metamórfica, que racha em pequenas folhas como se fossem lascas, resultado de um fluxo de xistosidade. Para além disso, apresenta um grau muito baixo de porosidade e metamorfótico. As suas características demonstram qualidade devido à sua durabilidade, resistência e baixa manutenção (Gomes, 2015), demonstrando-se adequada para várias aplicações.

2.1.1. Reconhecimento do território e ardósia local

A identidade do território de Valongo remonta há mais de 500 milhões de anos, onde as serras ainda não eram serras e a permanência das trilobites era evidente nos fundos marinhos argilosos, que deu origem à ardósia. O território permanecia submerso por um oceano, que apresentava uma grande biodiversidade, refletindo-se em espécies representativas de Braquiópodes, Lamelibrânquios, Cefalópodes e Artrópodes. O nome trilobite é devido a uma linha de corpo segmentado longitudinal em três lobos, mas também à evidência de uma divisão em três partes articuladas entre si. Possuíam um esqueleto exterior rígido, uma espécie de carapaça, que, devido ao crescimento, mudava essa carcaça separadamente em três partes, que eram depois arrastadas para zonas profundas do mar, onde abundavam sedimentos argilosos, que proporcionaram a fossilização. Foi a partir destes sedimentos que se formaram as ardósias, ricas em fósseis de trilobites e de outros organismos. Com a colisão entre os continentes, provocou-se uma elevação e dobramento das camadas geológicas, que formou a região anticlinal de Valongo. Ao longo do tempo, as camadas foram-se desgastando, relevando assim os registos fossilíferos e originando as duas serras (Município de Valongo, 2017), Serra de Santa Justa e Serra de Pias (Couto, H., & Lourenço, A., 2006).

A ardósia começou a ser extraída em meados do século XIX pela "Vallongo Slates & Marbles Quarries Company, Limited", que extraía e transformava a ardósia negra em minas de Valongo, desde 1930. Atualmente, as duas empresas ainda se dedicam à extração e também produzem vários produtos, nomeadamente as tradicionais lousas escolares (Ardósia, 2023) e aplicações em revestimentos de paredes e telhados para a construção de muros, arte funerária (como as campas), bancadas dos mercados públicos e em mesas de laboratório devido à sua elevada resistência à corrosão pelos ácidos (Leite & Guedes, 2022).

Os romanos utilizaram a rocha de forma a criar estelas funerárias e grande variedades de artefactos, mas as suas aplicações foram evoluindo ao longo dos séculos, com um uso na arquitetura vernacular, como um material disponível na natureza.

No século XIX, a lousa cada vez mais tinha possibilidades de utilização no dia a dia. Em 1861, a Câmara Municipal de Valongo levou a cabo um incentivo: enviar amostras para a exposição Industrial do Porto, devido às suas características (M. Valongo, 2018).

A ardósia (EN12440), mais conhecida por Lousa (Portas, 2018), tem uma tonalidade cinza azulado a cinza-escuro, devido à sua composição mineralógica. Apresenta uma constituição de ilite, quartzo e clorite, simultaneamente com os minerais mais invulgares. A sua uniformidade, compactação e granulometria fina permite uma foliação, em processo artesanal que prescinde do uso tradicional de ferramentas de corte. É um material bastante usual em vários pavimentos, devido aos seus atributos físicos, incluindo sua resistência aos ácidos, a sua durabilidade,

resistência à flexão e desgaste (Leite & Guedes, 2022).

A Lousa é pode ser reaproveitada entre 50% a 70% para fazer produtos, devido à viabilidade de ser um material moldável em várias maneiras, antimicrobiano, leve, sustentável e conferir a oportunidade de assumir texturas e numerosas cores (Pinto, 2018). As utilizações mais comuns são os telhados, o principal e a grande percentagem são os pavimentos, e depois tudo o que também é obra de construção civil, desde os parapeitos, rodapés aos tampos de cozinha, ou seja, tudo em que se usa pedra decorativa tem uma boa implementação de ardósia.

Ana Isabel Pereira, diretora comercial da empresa de Valongo reforça a afirmação de que a exploração da pedra teve início por ingleses, com o objetivo mencionado, na construção civil, para fazer telhados e fazer materiais de isolamento (Portas, 2018). Não só a ardósia era direcionada para revestir casas, como também era usada como lastro dos navios, que transportavam o vinho do Porto para Inglaterra (M. Valongo, 2018). A experiência no comércio e transporte marítimo propiciou o crescimento da indústria extrativa e a comercialização de produtos de lousa. Contudo, a Vallongo Slate não construía habitações para os operários (figura 5), uma vez que os trabalhadores construíam as suas casas ou pagavam rendas a privados, sendo uma coisa habitual de outras indústrias construírem as casas aos seus trabalhadores (Rocha, 2018).

Figura 5: *Habitações dos operários*

Fonte: *https://www.cm-valongo.pt/thumbs/cmvalongo/uploads/poi/image/10/museu_lousa_1_1024_2500.jpg*

Atualmente, estas habitações (figura 5) inserem-se o Museu da Lousa, localizadas no espaço do Centro Cultural de Campo, construídas com técnicas tradicionais de ardósia, semelhante ao muro ao redor. Foram casas reconstruídas de forma a preservar e divulgar a história da indústria de extração e processamento de ardósia da região. De forma a destacar a história e cultura da ardósia, dentro da estrutura inicial é uma reconstrução da habitação de um mineiro, incluindo a zona de cozinha, zona de descanso e uma oficina, tudo no mesmo espaço. As suas casas restantes exibem coleções e documentação relacionadas com a extração e transformação da ardósia (Valongo, 2016).

2.1.1.1. Método de extração local

O setor das rochas abrange duas vertentes principais: (i) a extração e (ii) a transformação. É um segmento que se carateriza pela qualidade estética da pedra, devido a uma elevada dureza e resistência. O material rochoso é submetido a uma série de processos de acabamento, que acabam por influenciar o seu valor de mercado. Estes processos melhoram a durabilidade, a resistência mecânica, a trabalhabilidade, e, especialmente, as propriedades estéticas, como a cor e a textura (Sobral, 2020a).

A ardósia tem uma propriedade que é aproveitada para a desmontar, que é a clivagem. Abriam os poços perpendicular à clivagem, poços esses com 130m de profundidade, 120m de comprimento e máximo 15m de largura, se se demonstrasse que a pedra se encontrava em condições. O método tradicional de extração era por minas subterrâneas e realizado com marretas, o que era um processo mais árduo e lento (Portas, 2018). A empresa teve a necessidade de criar uma nova liderança e investir em novos equipamentos que favorecessem o corte e manuseamento nas operações de extração e processamento, no início dos anos 80. Esta mudança revolucionou o processo de extração, adotando novos métodos de exploração de elevado rendimento, como a extração a céu aberto, ultrapassando os métodos tradicionais (Alves, 2021). Existe um maior aproveitamento das zonas com a extração de cima para baixo e aproveitamento da pedra, em que 50% do material era inutilizado nas paredes e no teto. Isto não só veio dar lucro, como também veio beneficiar os trabalhadores, em questões de segurança e mão de obra (Story, n.d.).

O novo método inicia-se por um mecanismo que desmantela a ardósia nos poços (figura 6), recorrendo ao roçador de laminas e o sistema de fio de aço, usadas nas explorações de mármore, para a execução dos cortes (Leite & Guedes, 2022). A exploração a céu aberto pode ser realizada em encostas ou em caves, o que acaba por envolver vários recursos tecnológicos, nomeadamente a escavação de taludes e a construção de patamares. O derrube em encostas implica na extração das rochas de cima para baixo, com o propósito de reduzir o impacto visual. Já relativamente ao derrube de profundidade, este consiste em descer os níveis do processo de extração, em forma de pirâmide invertida, de modo a garantir a segurança dos trabalhadores e prolongar a vida útil da operação (Alves, 2021).

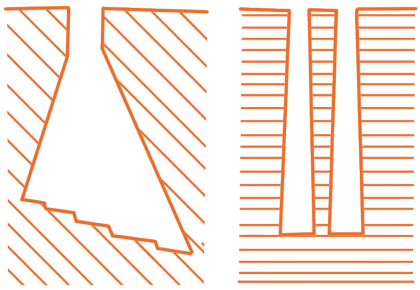


Figura 6: *Esquema dos poços*
Fonte: *Leite & Guedes, 2022,. desenhado pela autora. https://hdl.handle.net/10216/141561*

A extração consiste em obter blocos de forma e tamanho regulares, a partir de várias máquinas e operações, para satisfazer as exigências do mercado, com precisão dimensional e qualidade estética. A metodologia da extração passa por várias fases como: (i) a preparação e traçagem, que é uma fase inicial que consiste na exposição da rocha e na delimitação da área de corte; (ii) o desmonte, que envolve a extração e a preparação da rocha através da perfuração e o corte; (iii) a remoção e o transporte, que incluem um processo de carregamento e transporte dos blocos, o que permite que seja comercializável. O material que é considerado resíduos é encaminhado para escombreiras.

A figura 7 apresenta o processo de transformação da rocha ornamental acabada de sair da extração em forma de bloco até à finalização do produto final. O processo inicia-se pela preparação dos blocos, que passa pelo esquadrejamento, um corte em esquadria mediante a marca dos traços paralelos, para aperfeiçoar a utilização da rocha e facilitar a serragem. É uma fase que permite minimizar o consumo de energia e resíduos, sendo um processo que ocorre no local (Leite & Guedes, 2022).

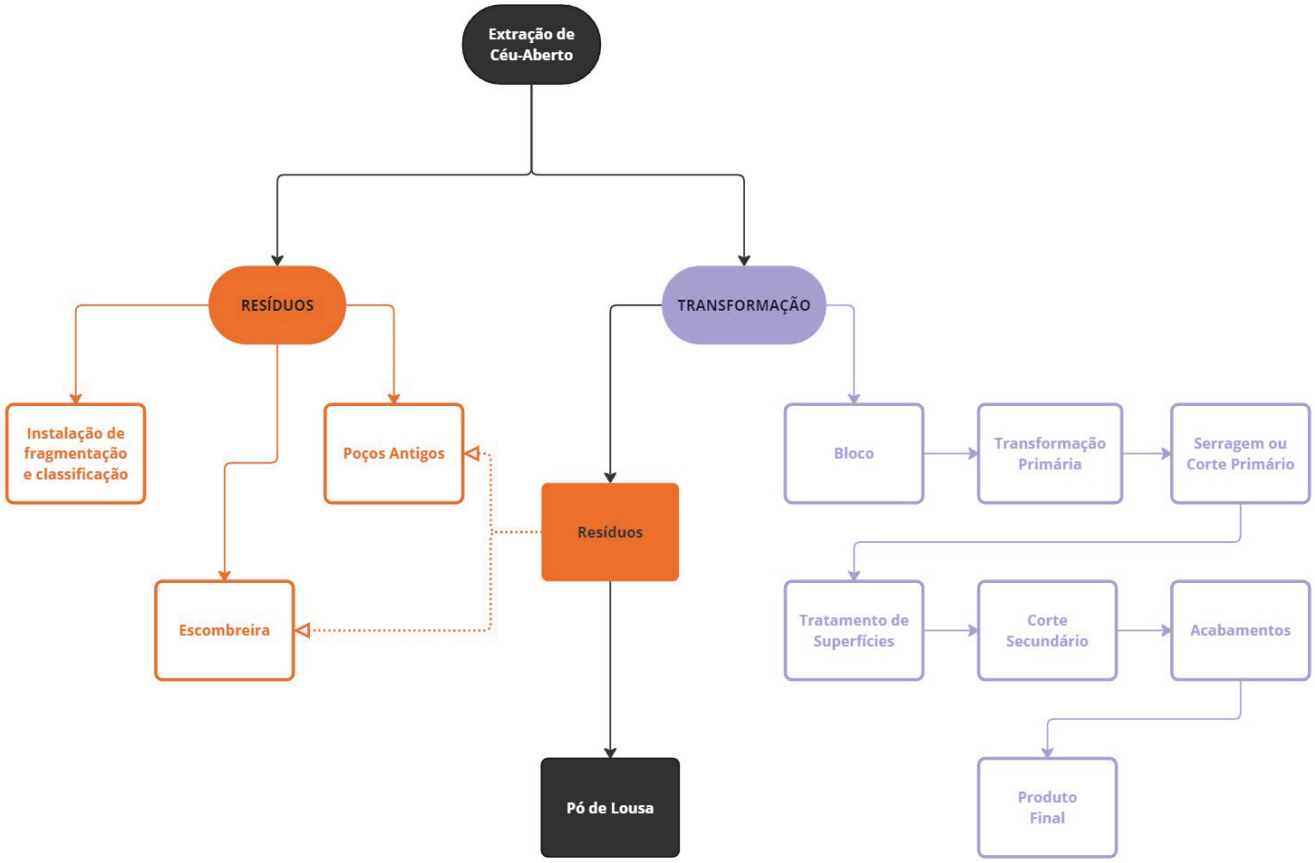


Figura 7: *Processo da extração a Céu-Aberto*
Fonte: *Adaptado pela autora de gráfico de Alves, 2021; Leite & Guedes, 2022*

Após a extração, ou seja, o bloco e transformação primária, é efetuada a serragem e, em seguida, passa-se para o tratamento de superfícies, uma vez que este assegura o aspeto do produto final. Nas operações de corte secundário e acabamento, o produto foi fabricado utilizando um processo assistido por computador e máquinas CNC, permitindo um aumento da capacidade de produção (Leite & Guedes, 2022).

A transformação primária realiza-se no local e tem como objetivo tornar as superfícies dos blocos planas e uniformes. É um procedimento que melhora a eficiência do corte primário e que, na utilização, é necessária uma abundância de água para a limpeza do corte, proporcionando o arrefecimento das ferramentas de corte. O corte primário permite uma transfiguração de um bloco em chapas de diversas espessuras, e como ardósia é uma pedra com uma "esfoliação", ou seja, camada sobre camada, permite que o corte se torne mais fácil e prático. Este processo de corte tem a necessidade de uma composição de uma pasta abrasiva, que melhora o desempenho do corte. Isto é, uma pasta composta por granalha de aço ou ferro fundido, cal e água canalizada através das laminas para facilitar o corte. A adição da cal vai regular a viscosidade conter a granalha e o pó de pedra. Além disso, serve para arrefecer a lâmina, diminuindo o desgaste e evita a oxidação de partículas de grão e de rocha. Na aplicação de tratamentos superficiais, serve para harmonizar as superfícies das chapas e para conferir uma variedade de acabamentos. O objetivo é destacar as caraterísticas naturais da pedra, como a cor e a textura, devido ao acabamento superficial, que provoca um impacto visual e na resistência. O corte secundário é um ato de vários cortes, de modo obter produtos finais. De seguida, é necessário realizar um controlo da qualidade para permitir executar a embalagem e distribuição dos produtos. E esse ciclo de produção engloba uma série de processos que implicam o desgaste do material das rochas (Sobral, 2020).

As diferentes etapas do processo, desde a fase inicial de extração até à fase posterior de transformação, conduzem inevitavelmente à acumulação de resíduos. São resíduos gerados por decapagens e tratamento do bloco, devido ao corte e o uso de água (Sobral, 2020).

2.1.2. Resíduos de indústria e o impacto ambiental

A indústria de rochas ornamentais gera uma quantidade significativa de resíduos provenientes da extração e processamento de pedra, incluindo o pó de pedra, minerais rejeitados e lamas. Para reduzir o volume de desperdício, como as lamas, estas são submetidas por decantação com floculantes e filtros-prensa para extrair a água antes da sua colocação em aterros ou escombreiras (Sobral, 2020). A utilização de materiais e os processos necessários para a extração exige um grande consumo de energia na indústria, o que contribui significativamente para as emissões de dióxido de carbono (CO_2). De facto, a indústria no seu conjunto é responsável por cerca de 20% das emissões totais de CO_2. Para prevenir esse impacto excessivo de carbono, a reintrodução de resíduos industriais,

atualmente em aterros, na produção é uma estratégia importante (Maia et al., 2022). A viabilidade económica deste tipo de tratamento de resíduos depende da redução dos custos de escoamento em comparação ao valor das matérias-primas secundárias aproveitadas (Souza & Mansur, 2004).

Para a indústria, é crucial otimizar a utilização dos resíduos do processo de industrialização (Souza & Mansur, 2004). A ardósia é uma rocha que, em dependência das condições geotécnicas, pode estar localizada a uma profundidade específica, para tal surge a necessidade de extrair grandes volumes de material sem valor comercial (Alves, 2021). A extração leva ao desperdício deste recurso natural e de outros, por consequência, uma vez que nem todos os resíduos são utilizados de forma eficiente. O desperdício pode ser resultado da estrutura da rocha, fraturas no momento da foliação e leitos de ardósia, sendo considerados resíduos inertes e recicláveis.

Esses resíduos também acabam por ser acumulados nos reservatórios e cursos d'água (Pereira, 2006). Este acontecimento é gerado pelo corte e polimento na indústria, que são meritoriamente por gravilha, água e lubrificante. Desta forma, é criada uma lama de diferentes tamanhos de partículas, que podem ser submetidos a um processo de lavagem e, em prol disso, os resíduos podem ser reutilizados para produzir materiais alternativos (Souza & Mansur, 2004).

Tendo em conta os resíduos acima referidos, foram salientados os riscos potenciais associados às escombreiras e foi proposta a redução destes resíduos através do corte a laser ou da reutilização noutras aplicações bem como a criação de um substituto para os agregados. No entanto, continua a reproduzir resíduos, nomeadamente a lama, pó e resíduos de ardósia, que são armazenados nas pedreiras e causam problemas económicos e ambientais (Oti et al., 2010).

No setor industrial existe um aumento do consumo de matérias-primas e da produção de resíduos. Neste contexto, gerou-se uma elevada consideração na reciclagem de materiais e nas técnicas de tratamento de resíduos, na indústria, nas universidades, nos centros de investigação e tecnológicos, prevenindo que o desperdício tenha tanto impacto. Os resíduos por vezes não são eliminados de forma correta, com o devido tratamento, o que acaba por ter um impacto no ecossistema. Os custos elevados do descarte dos resíduos, faz surgir a necessidade de arranjar alternativas de preparação para separar materiais que poderiam ser uma mais-valia para a reciclagem (Souza & Mansur, 2004). As iniciativas industriais e legislativas – taxas e impostos – sobre os agregados e aterros, têm como objetivos obrigar as empresas ter mais consciencialização e a repensar as alternativas práticas nos processos e a promover a compreensão da utilização de materiais de construção secundários em

vez da extração de materiais primários. Os processos de extração nos agregados convencionais originam no consumo de energia para efeitos de extração, processamento e transporte, o que, por sua vez, leva à emissão de gases com efeito de estufa (Oti et al., 2010).

2.1.3. Pó de ardósia e cerâmica

É crucial adotar uma economia circular, focada na reutilização dos materiais, que visa o crescimento sustentável, minimizando os impactos do ciclo de vida dos produtos. A indústria cerâmica é um exemplo de uma boa aplicação para aproveitar os resíduos e subproduto, com a incorporação de materiais da própria e de outras indústrias, como por exemplo: lama vermelha (Babisk et al., 2020; Yang et al., 2008), geopoliméricos (Azevedo et al., 2020), entre outros, promovendo estratégias de economia circular (CTCV, 2021).

A indústria tem vindo a demonstrar um grande potencial e investimento na substituição de matérias-primas naturais por resíduos, resolvendo o problema da quantidade excessiva de desperdício e preservando os recursos naturais. Vários estudos identificaram potenciais matérias-primas alternativas na inclusão de resíduos e subprodutos industriais, em vez das matérias-primas convencionais (Hossain & Roy, 2020), tais como: cinzas volantes (Coutinho & Vieira, 2016; Hossain & Roy, 2020), cinzas de casca de arroz, escórias de alto-forno, lamas, resíduos de vidro, resíduos de azulejos polidos, casca de ovo, resíduos de pó de mármore, resíduos da produção de petróleo, resíduos de processamento de papel, resíduos de azulejos polidos (Hossain & Roy, 2020), resíduos de algodão, resíduos de chá, resíduos de serragem ou madeira (Khan et al., 2021).
A exploração das rochas ornamentais como a ardósia, está associada a questões ambientais, sendo a principal preocupação os resíduos gerados desde a extração da matéria-prima até ao produto final. Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de promover uma economia circular no sector das rochas ornamentais, com especial enfoque na maximização do aproveitamento dos resíduos de ardósia. Estes estudos incluem:

"*Ardósia como matéria-prima para cerâmica*" | Oliveira, (2000)

Estudos que englobam a ardósia como matéria-prima para a cerâmica, sendo examinadas as propriedades de três amostras de desperdícios de ardósia (cinza, verde e grafite) da Formação Santa Helena, de Minas Gerais. Os testes incluíram uma avaliação na análise química e mineralógica, caraterização da cor depois da cozedura devido a altas temperaturas, absorção de água, porosidade aparente, resistente à flexão, a retração do

material por efeito às altas temperaturas e massa especifica. Os resultados demonstram que as amostras são compatíveis com as argilas geralmente utilizadas na fabricação de produção de cerâmica vermelha ou estrutural. Uma vez que existe uma falta de plasticidade (avaliada a norma ABNT NBR 7180) devido ardósia, não pode ser aplicada isoladamente, mas pode ser misturada com argilas de elevada capacidade de aglutinação, que desempenham como um desplasticante, ao apresentar um índice próximos a zero. As amostras foram adotadas a temperaturas de 950 e 1050ºC para a caracterização cerâmica dos materiais. A incorporação de desperdícios de ardósia a massas de cerâmica vermelha é benéfica, uma vez que proporciona uma boa vitrificação e resistência mecânica a baixas temperaturas (Oliveira, 2024).

> "*Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles*" | Campos et al (2004)

Este estudo avalia a viabilidade da utilização de lamas e resíduos como matérias-primas para componentes estruturais. O objetivo é determinar a pressão de compactação, a temperatura de cozedura e a dimensão máxima das partículas ideais para os resíduos de ardósia, de forma a que exista uma produção de telhas de alta qualidade. O estudo procedeu a uma análise pormenorizada de amostras de resíduos de ardósia, com temperaturas até 1400ºC, de forma a entender o seu comportamento. As análises das amostras passaram por um estudo de avaliação sob prensagem em moldes retangulares (100 mm x 35 mm) sob pressões de 30, 35 e 45 MPa, e sinterizadas a 1100°C e 1150°C durante 30 minutos em ar, uma aglomeração e compactação dos pós e partículas, de forma a obter peças sólidas. Neste estudo, ao ser avaliada a retração, a perda de peso, a densidade, a resistência à flexão e a permeabilidade, os resultados demonstram que os resíduos de ardósia são adequados como matéria-prima para ladrilhos cerâmicos, considerando que estão dentro dos parâmetros dos ladrilhos cerâmicos convencionais (Campos et al., 2004).

> *"Study of pore size distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders"* | Mansur et al., (2006)

Neste estudo foi avaliada a distribuição do tamanho de poros de peças de cerâmicas produzidos a partir de resíduos de pó de ardósia através do processo de slip casting. Com o objetivo de analisar a estrutura dos poros durante o tratamento térmico e modificações na morfologia. Após a secagem (temperatura ambiente por 24h) e o tratamento térmico (100ºC durante 24h), as amostras em estado "verde" foram para o processo de queima a uma temperatura inicial de 100 °C com a intenção de atingir 1000 °C. Os resultados deste processo, demonstram que o pó de ardósia tornou as peças de cerâmica "verdes", com elevada porosidade. Subsequentemente a cozedura apresentou uma porosidade reduzida com um tamanho médio de poro aumentado. Além disso observou-se que a porosidade pode ser otimizada ajustando-se adequadamente a fração sólida e o conteúdo de dispersante nas suspensões, o que permite

controlar esses parâmetros no processo de fundição (Mansur et al., 2006).

> *"Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes"* | Souza & Mansur, (2004)

Este estudo foca-se na recuperação de desperdício de pó de ardósia, usando o processo de slip casting para produzir peças em cerâmica. Este método é muito utilizado na produção industrial de cerâmica e substratos multicamadas. A abordagem ambiental é bastante presente, impulsionando novas técnicas para a reciclagem de materiais, como a ardósia. No procedimento experimental, as peças foram moldadas em moldes de gesso, nas quais as suspensões aquosas, foram misturadas com barras de agitação por 30 minutos e preparadas com diferentes concentrações de dispersante e o ligante. Após a fundição por barbotina (slip casting), as peças secaram em temperatura ambiente por 24h, e de seguida ao processo de vazamento do slip casting passou para tratamento térmico com aquecimento em estufa a 100 °C até temperaturas de 1000 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A ardósia demonstrou ter uma alta concentração de quartzo no pó de ardósia e evidenciando peças com menor porosidade. O dispersante comprovou ser eficiente na estabilização e distribuição da suspensão de ardósia e bons resultados em peças com porosidade reduzida (Souza & Mansur, 2004).

> *"Ceramic products obtained from rock wastes"* | Catarino et al., (2003)

O objetivo é verificar as variáveis, tais como: a distribuição do tamanho das partículas, a pressão de compactação e o ciclo de sinterização, na densidade dos produtos, de forma a obter bons resultados para produtos cerâmicos, como pisos e telhas, realizados com pós de ardósia. Este estudo foi efetuado em várias fases para atingir o resultado pretendido.
Foram realizados ensaios de absorção de água e resistência à flexão em 12 provetes com dimensões 170mmx5mmx1mm. As amostras industriais evidenciaram maior porosidade, proporcionando redução da densidade e aumento da absorção de água comparando às amostras que foram realizadas. A produção de telhas com desperdício de pó de ardósia demonstrou ser viável com propriedades superiores às da argila (Catarino et al., 2003).

> *"Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste"* | Souza et al. (2010)

Este estudo aborda o uso de resíduos de rochas orgânicas na indústria da cerâmica, como uma alternativa de baixo custo e sobre o seu impacto ambiental. A indústria do corte de rochas ornamentais inclui o granito, mármore, ardósia, quartzito, e outras, que gera grandes quantidades de resíduos de lama, pó de rocha, granalha metálica e água (Souza et al., 2010). O estudo aborda o uso de rocha ornamental, tais como: a mistura de resíduos de granito e mármore com argila vermelha, que permitem tijolos com boas propriedades técnicas, com uma incorporação até 35%

de resíduos de mármore em tijolos de argila e telhas (Montero et al., 2009; Moreira et al., 2008) e uma mistura até 40% de resíduos de granito em telhas de argila vermelha (Torres et al., 2009), sendo que ambos os resíduos resultam em excelentes propriedades técnicas como a absorção de água, resistência mecânica, retração linear, índice de plasticidade e água de extrusão.

O estudo utilizou fórmulas de resíduos de corte de rochas ornamentais, que não é especificado, mas apresenta uma incorporação até 47,5% (em peso) de resíduo. Os resultados mostram alterações nas propriedades tecnológicas, como o a retração, densidade, absorção de água e resistência à flexão, nas peças de ladrilhos com a introdução de resíduos e da temperatura da queima de 1190ºC até 1250ºC. Demonstrou que a microestrutura são influenciadas pela adição de resíduos. Demonstrando efeitos notáveis na qualidade dos ladrilhos, como a absorção de água (Souza et al., 2010).

Tabela 1: *Síntese dos estudos de pó de ardósia e cerâmica.*

Autores	Incorporações de resíduos de ardósia	Queima	Vantagem da Incorporação
M. C. de A. Oliveira, n.d. (2000)	----	950ºC e 1050ºC	Melhoria das Propriedades: Aumento da plasticidade, resistência mecânica e estabilidade dimensional. Redução de Custos: Ao substituir matérias-primas caras.
Campos et al (2004)	≈70%	1100°C/ 30 min em ar 1150°C /30 min em ar	Aumenta a resistência mecânica e a durabilidade dos azulejos estruturais sinterizados. Minimiza os custos de produção ao substituir matérias-primas convencionais. Melhora as propriedades térmicas dos produtos cerâmicos
Mansur et al. (2006)	48%; 68%; 73%; 78%	100 °C - 1000 °C (taxa = 10°C/min)	Controle de Porosidade: Distribuição do tamanho dos poros, melhorando as propriedades físicas dos produtos cerâmicos. Melhora a resistência e a durabilidade das peça. Otimiza o processo *Slip Casting.*
F. Souza & Mansur (2004)	48%; 53%; 63%; 68%; 73%; 78%	100 °C - 1000ºC (taxa = 10°C/min)	Aumenta a resistência e a dureza das peças. Eficiência de Produção: melhora a homogeneidade e a qualidade das peças. Permite a utilização de diferentes tipos de resíduos.
Catarino et al. (2003)	50%; 60%	1150ºC e 1170ºC	Diminui os custos de produção ao substituir matérias-primas convencionais por resíduos reciclados. Aumenta a resistência e a durabilidade dos produtos. Possibilita a criação de uma variedade de produtos cerâmicos e Introduz novas técnicas e processos que aproveitam resíduos.

A. J. Souza et al. (2010)	10%; 20%; 30%; 40%; 47,5%	1190; 1210 °C; 1230 °C; 1250 °C	Resistência e durabilidade dos azulejos. Diminui os custos de produção ao substituir matérias-primas tradicionais por resíduos reciclados. Incorporando características estéticas dos resíduos de rochas ornamentais

Os estudos acima referidos demonstraram que a utilização de pó de ardósia na produção de cerâmica oferece uma série de vantagens. Demonstram que os resíduos podem ser incorporados em argilas, porcelanato, cerâmica vermelha, tijolos, telhas e pavimentos ou azulejos cerâmicos, melhorando assim propriedades, a contração linear e a resistência mecânica. Além disso, a quantidade de desperdício introduzidos apela bastante à sustentabilidade. A proporção de ardósia utilizada nos estudos é considerável, com algumas percentagens superiores a 50%. Apesar disso, os resultados da incorporação de resíduos são favoráveis. No estudo, intitulado *"Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste"*, demonstra-se que a utilização de resíduos alternativos, como o granito e mármore (da família das rochas ornamentais), também pode ser vantajosa, permitindo controlar a coloração e defeitos de caliche – imperfeições que ocorrem na superfície, como manchas brancas, bolhas, superfícies ásperas e fragilidade – das peças durante a cozedura em altas temperaturas.

Para além das análises acima referidas, os estudos permitem examinar as temperaturas de cozedura favoráveis que possam a vir ser incorporadas no plano experimental apresentado no capítulo 3, com aplicações que vão de baixas temperaturas (950°C e 1000°C) a altas temperaturas (1050°C a 1250°C).

2.1.5. Projetos com ardósia e outros materiais

Neste contexto, surge o uso de desperdícios de ardósia com o foco da criação de produtos. De forma a contribuir para a redução de resíduos, promover a economia circular, onde os materiais são reaproveitados em novos produtos. Os projetos que irão ser mencionados tencionam explorar as possibilidades do uso de desperdício de ardósia como foco, com a incorporação de outros materiais para além da cerâmica, mostrando a viabilidade do estudo do material, de forma apresentar bons resultados na incorporação de um produto.

Geo Slate | Creative Industry Netherlands, (2018)

Geo Slate é um projeto feito com base em fluxos de resíduos da pedreira e tecnologia de geopolímero Sqape, que se baseia na criação de um sistema de fachada para aplicações externas e internas, preservando os edifícios históricos e o mercado de restauração. É um projeto com implementação num monumento histórico, pelo que era importante

preservar as propriedades estéticas (a cor) da ardósia.
Na fase do estudo do material, o pó de ardósia foi dividido em dois ensaios separados: com cerâmica (desperdício industrial) e com esmalte (vidrado). As amostras de cerâmica passaram pela fase de cozedura, com temperaturas de 980ºC e 1200ºC, as amostras cozidas com o calor mais elevado eram comparáveis às amostras de grés que não atingiram a temperatura de fusão (vitrificação) completa, mas eram difíceis de moldar. As experiências de misturas de vidrado produziram uma cor clara, amarelo-transparente e resultaram num revestimento forte sem defeitos visíveis. O resultado final destas experiências foi uma telha cerâmica vidrada constituída por 80% de material reciclado (Biryukova, 2022).

Figura 8: *Telhas de ardósia para cobrir monumentos históricos*
Fonte: *https://www.studiomixtura.com/geo-slate*

Slatetec | Fernando Cunha, Fibrenamics, Rui Teotónio Pereira e Raul Fangueiro, (2018)

Slatetec utiliza o pó de ardósia gerado durante os processos de moagem e secagem de lamas, abordando a questão de aproximadamente 9 toneladas de resíduos diários em minas antigas. Esta iniciativa promove uma mudança da economia linear, para uma economia circular sustentável. Embora o agente ligante específico não seja divulgado, a tecnologia é descrita como um eco composto leve, sustentável e antibacteriano (Monteiro, 2018). As placas são compostas por uma resina termoendurecível e pó de ardósia, em que pode ser concebida com versatilidade (Story, n.d.). Com a capacidade de adotar várias texturas de superfície, cores (através de corantes) e formas tridimensionais, torna-o adequado para diversas aplicações, como decoração de interiores, revestimentos de fachadas e pavimentos, bem como mobiliário urbano e técnico (Monteiro, 2018).

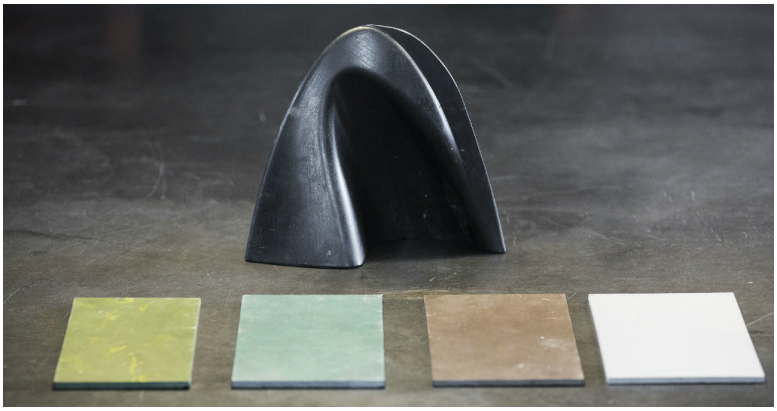


Figura 9: *Slatetec de diferentes formas e diferentes texturas*
Fonte: **https://www.publico.** *pt/2018/04/16/p3/noticia/dos-restos-em-po-da-ardosia-criouse-um-novo-material-sustentavel-1833320*

Mineral | Fibrenamics (2018)

Fibrenamics é um projeto sustentável com o objetivo de transformar os resíduos de várias indústrias para a elaboração de novos produtos, integrando o design, a engenharia e a criatividade no desenvolvimento de produtos. Esta iniciativa foi organizada pela Plataforma Internacional Fibrenamics da Universidade do Minho, em colaboração com o Centro de Valorização de Resíduos (CVR), uma organização sem fins lucrativos, no sector da valorização de resíduos (Fibrenamics, 2018).

O principal motivo dos resíduos minerais resulta da extração de recursos minerais, especialmente da exploração de pedreiras, com uma percentagem aproximada de 85%, devido ao processo de corte e tratamento em indústrias. Estas indústrias geram grandes quantidades de desperdicio, com diferentes dimensões de partículas. Prevê-se um impacto considerável no ambiente, devido à quantidade de toneladas de resíduos. O processo de extração tem origem numa gama diversificada de tipos de rochas, incluindo metamórficas e vulcânicas. As rochas metamórficas contrastam com as rochas vulcânicas, sendo as mais comuns o calcário, a ardósia, o granito, o mármore e o basalto. O modelo representado na figura 8 utiliza o basalto como material base, que por sua vez proporciona oferece diversidade na cor, textura e granulometria. (Fibrenamics Green, 2018).

Figura 10: *Amostra de Resíduo mineral*
Fonte: *https://green.fibrenamics.com/modelos-demonstradores-mineral*

Os projetos mencionados demonstram viabilidade técnica, económica e ambiental no reaproveitamento de resíduos de ardósia, explorando diferentes métodos e aplicações completamente diferentes, com o objetivo em comum de melhorar as suas propriedades e aplicações no desenvolvimento do material - favorecem o material através da criação de projetos aplicados no setor de construção. No caso do “Geo slate” e do “Slatetec”, estes aplicam resíduos de ardósia, na tentativa de trazer novos usos (telhas e painel compósito), enquanto o projeto “Mineral” transforma materiais naturais em produtos a promover impacto ambiental.

Estes projetos promovem os princípios da economia circular através da reutilização de ardósia e da demonstração da viabilidade económica da criação de produtos, proporcionando assim soluções sustentáveis.

2.1.6. O papel do design na sustentabilidade

Este é um tema recentemente abordado com a importância devida. O design circular apresenta-se como um método que prevê, através da sua constante utilização, a maior longevidade dos produtos, mantendo a economia que acompanha todo este processo no seu valor mais elevado. Este conceito baseia-se maioritariamente em 3 princípios fundamentais: (i) eliminação de desperdícios e diminuição da poluição, (ii) criação de um movimento circular para produtos e materiais e (iii) a regeneração da natureza (Macarthur, 2021).

Atualmente, grande parte das empresas e negócios realizados são direcionados a uma estratégia de design linear, contrariando a crescente tendência. Uma mudança de paradigma é necessária e apenas possível através da alteração e criação de novas estratégias que favoreçam a tendência, possibilitando a alteração de incentivos para os clientes e, consequentemente, elevando a experiência que estes obtêm a partir da utilização dos produtos (Macarthur, 2021).

2.1.6.1. Material Driven Design

O papel exercido pelos materiais a nível da estruturação do ambiente e, consequentemente, na nossa vivência, é incontestável (Sastre, 2020). À medida que uns materiais contribuem para uma economia linear que culmina no desperdício de resíduos, outros, tal como o aplicado no projeto, contribuem para uma economia circular que resulta na reintegração dos recursos no ciclo, prolongando-o (Llorach, 2020). O processo de caráter interativo do *Material Driven Design* vem não só permitir uma nova reestruturação da economia, como também alargar os horizontes da investigação nesta área, através da introdução de novas matérias com recurso a novas tecnologias, como a impressão 3D, impulsionando a evolução do Design e da sociedade.

O *Material Driven Design* (MDD) corresponde ao processo de conhecimento profundo e detalhado de um material, obtido através de experiências e comparações com materiais pré-existentes. Este processo permite que, posteriormente, seja aplicado no produto que melhor o complemente e usufrui das suas características (Karana et al., 2015).

No seio do MDD existem diversas metodologias (figura 11), sendo uma das mais focadas na sustentabilidade constituída por: Pesquisa do Material (1), Manipulação e Desenho do Material (2) e Desenvolvimento do Produto (3) (Bak-Andersen, 2018). Na fase 1, é efetuada uma revisão de literatura sobre o material, e simultaneamente o mesmo é estudado pelos sentidos, para uma melhor definição das suas características. Na segunda fase, aplicam-se diversas técnicas e processos de forma a compreender melhor o potencial do material e de que forma se adequa a funções, formas ou estética, para a projeção do mesmo. Por fim, no

desenvolvimento do produto, adequa-se o material a uma forma, função e método de produção (Bak-Andersen, 2018).

No seio do MDD existem diversas metodologias (figura 9), sendo uma das mais focadas na sustentabilidade constituída por: Pesquisa do Material (1), Manipulação e Desenho do Material (2) e Desenvolvimento do Produto (3) (Bak-Andersen, 2018). Na fase 1, é efetuada uma revisão de literatura sobre o material, e simultaneamente o mesmo é estudado pelos sentidos, para uma melhor definição das suas características. Na segunda fase, aplicam-se diversas técnicas e processos de forma a compreender melhor o potencial do material e de que forma se adequa a funções, formas ou estética, para a projeção do mesmo. Por fim, no desenvolvimento do produto, adequa-se o material a uma forma, função e método de produção (Bak-Andersen, 2018).

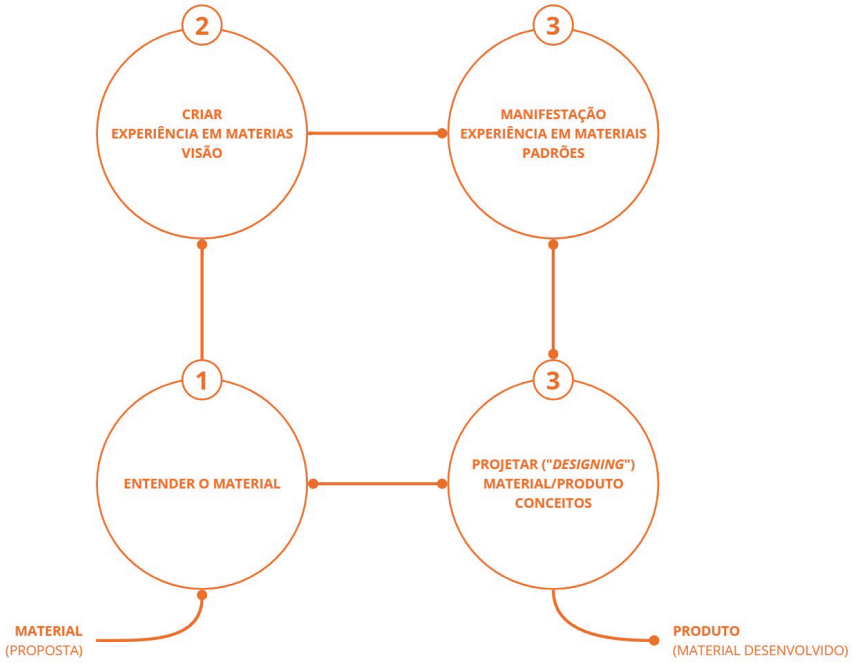


Figura 11: *Metodologia Material Driven Design (MDD)*
Fonte: *Karana, Barati, Rognoli, & van der Laan, 2015 desenhado pela autora*

2.2. Impressão 3D

Neste ponto será abordado a impressão 3D, incluindo os princípios básicos da fabricação aditiva, os benefícios, as suas aplicações e por sua vez a sustentabilidade. No entanto, centrar-se-á principalmente na utilização de materiais cerâmicos e na implementação de resíduos industriais na impressão 3D, que será o alvo da investigação.

O texto apresenta uma série de pontos importantes e benéficos para o desenvolvimento de materiais, que serão aplicados como critérios de avaliação para experiências futuras, incluindo o procedimento de impressão 3D, as propriedades do material e impressão.

2.2.1. Fabrico aditivo

Os princípios básicos do fabrico aditivo englobam tecnologias que constroem peças através da adição sucessiva de camadas, permitindo obter formas simples ou complexas (Lino et al., 2023). Normalmente, são categorizados com base nos materiais em filamento/pasta, pó e folha sólida (Prakash et al., 2017). A forma e as propriedades mecânicas são geradas simultaneamente com base em estratégias de fabrico e parâmetros especificados num ficheiro eletrónico (Lino et al., 2023).

O cenário da indústria está sempre em constante mudança, com novos surgimentos fabrico aditivo, tem crescido cada vez mais as áreas aplicadas nessa tecnologia (Diegel, 2014). Com esses avanços, os processos evoluíram de prototipagem rápida para um processo de fabrico rápido, como um meio de ferramenta e peças de utilização final para indústria (Prakash et al., 2017). Todo essa evolução é devido às vantagens económicas, que permitem o fabrico de peças complexas, que acabam por ter um processo caro no método tradicional, ou até mesmo impossíveis de produzir, noutro tipos de processos (Tempelman et al., 2014).

Neste caso, a fabricação aditiva acaba por ser uma fabricação rápida e menos dispendiosa. Para além dessas vantagens, também apresenta potencial na sustentabilidade: em função de maior eficiência na utilização de recursos; cadeias de valor reconfiguradas, como produção mais localizada e modelos inovadores (Ford & Despeisse, 2016). Fora os benefícios do Design, como a liberdade de criar formas complexas, em curto espaço de tempo e a facilidade de fazer melhorias. No entanto, mesmo com as evoluções atuais, existe uma necessidade de elevar essa tecnologia na indústria, requerendo mais investigação e desenvolvimento em termos de design, matérias, processos, aplicações biomédicas e de sustentabilidade (Prakash et al., 2017).

Prevê-se que o fabrico aditivo demonstre resultados favoráveis em termos de sustentabilidade, apesar da utilização generalizada e substancial de maquinaria associada, uma vez que os desempenhos económicos e ambientais estão interligados, e os custos iniciais das máquinas e dos materiais são bastante elevados. Todavia prevê-se que os volumes de produção mais elevados aumentem a rentabilidade do fabrico aditivo, como um meio de estratégia para a redução da pegada ambiental (Ford & Despeisse, 2016). O método de fabrico tradicional exige uma seleção de materiais, geometria e processos, o que vai acabar por diferenciar bastante o técnico-económico. Os custos são variáveis, devido ao aumento de volume de produção e à complexidade de geometria. O tempo de produção, o controlo de qualidade e as taxas de rejeição de peças aumentam, o que vai derivar o tempo necessário de produção. Na fabricação aditiva, deixa de haver necessidade de custos de produção significativos, independentemente da complexidade do produto e da quantidade limitada de produção (Leary, 2020).

2.2.2. Impressão 3D em cerâmica

O fabrico aditivo apresenta vários tipos de processos, que constroem e incorporam camadas de formas diferentes. O principal processo (figura 12) utilizado começa pela realização de um modelo, que pode ser representado através de programas 3D, como o CAD (*Computer-Aided Design*). Já referente ao pré processo, é preciso gerar um ficheiro STL – Capacidade de guardar informação sobre o processo – e de seguida fazer o slicing, que permite transformar o desenho em coordenadas e direções, em que passa por um programa que possibilita as variáveis do processo, como o fluxo de impressão e as dimensões do bico. É da sua responsabilidade garantir a qualidade da impressão e devem também ter em conta o tempo de trabalho, que deve ser incluído nos seus cálculos. O processo de fabrico rápido serve para avaliar o produto de forma rápida, para facilitar qualquer tipo de alteração no modelo digital, se for necessário. Esta tecnologia não vai só permitir uma produção mais rápida, como também vai proporcionar baixos custos e reduzir o tempo de produção (Reis, 2021).

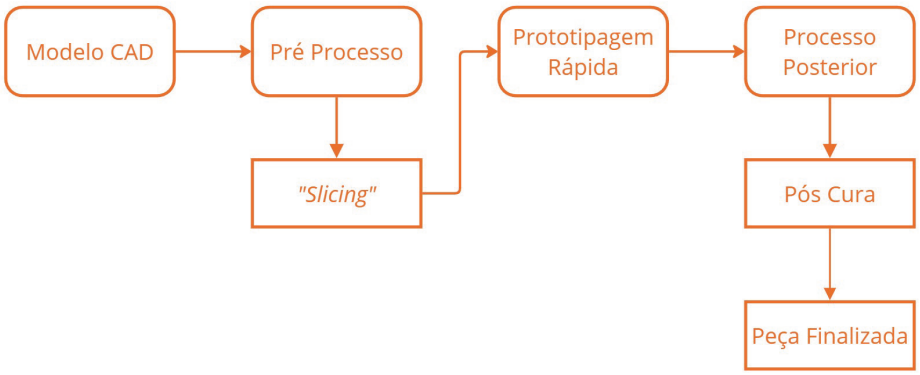


Figura 12: *Processo de prototipagem rápida*
Fonte: *Adaptado pela autora de gráfico de Prakash, 2017 e Neto, 2021 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317329152?via=ihub*

A impressão 3D apresenta benefícios, devido à possibilidade de usar uma variedade de materiais, como implementar o uso de resíduos como base, fazendo com que exista uma redução no impacto ambiental e assim contribuir para o conceito da economia circular (Khan et al., 2023). de forma a reduzir uma grande quantidade de resíduos de indústria e construção e garantir uma redução da variedade de materiais que seriam necessárias para uma construção convencional (Robayo-Salazar et al., 2023).

Já abordando o material, para tornar os materiais adequados para a impressão 3D, é necessário que o material possua caraterísticas específicas baseadas na: trabalhabilidade, fluidez, a capacidade de bombeamento, extrusão, retenção de forma, retração, capacidade de impressão, aderência entre camadas e tempo de abertura. Estas características estão diretamente ligadas à composição do material, que tem o potencial de afetar significativamente as propriedades de impressão. Capacidade de impressão: refere-se à capacidade e fiabilidade da

aplicação do material através de uma impressão (Labonnote et al., 2016). De forma fluida, sem qualquer deformação durante o processo de extrusão, ou seja, de forma a permitir suportar o seu próprio peso e das camadas subsequentes posteriores à extrusão (Amran et al., 2022).

Trabalhabilidade: o parâmetro favorece os processos de Bombeamento e extrusão. No entanto, eleva a probabilidade de deformação e desmoronamento da camada (Teixeira et al., 2023).

Fluidez: A fluidez é caraterizada pela facilidade com que o material é bombeado, direcionado e extrudido da saída do bocal da impressora 3D. É importante que tenha uma boa fluidez, com uma extrusão continua. Para isso, é necessário que a mistura esteja fresca, e a quantidade de água é um dos fatores principais significativo para uma boa fluidez, em que deve ser adequada aos requisitos de impressão. Erhan Güneyisi afirma que a fluidez pode ser melhorada através da integração de aditivos minerais para aperfeiçoar a granulometria, que proporciona uma mistura densa e compacta (Lyu et al., 2021).

Capacidade de bombeamento: é a capacidade de suportar peso de uma camada extrudida bombeada do reservatório para o bocal, sem haver qualquer alteração na geometria e entupimento (Amran et al., 2022).

Capacidade de extrusão: o desafio da extrusão é permitir que um material seja extrudido através de um bocal de impressora com um gasto mínimo de energia e a velocidades variáveis (Nerella & Mechtcherine, 2019). A relação entre o tamanho das partículas agregadas e o diâmetro do bocal de extrusão pode vir a ser um dos fatores que pode afetar a extrusabilidade, devido a bloqueios no bocal e a fissuras no material (Lyu et al., 2021).

Retenção de forma: como o nome indica, o material após a extrusão, deve manter a sua forma. Para ser possível, é necessário que o peso do material suporte o próprio peso sem deformação (Panda & Tan, 2018).
Retração: é induzida pela secagem, que, por consequência, pode provocar fissuras e fendas, que vai influenciar o aspeto e o desempenho mecânico. É possível controlar a retração por meio de adição de minerais e uma baixa concentração de água com o material, reduzindo a deformação no processo de secagem e com o aumento de agregados finos, pode reduzir a retração (Robayo-Salazar et al., 2023).

Capacidade de construção: é um método de avaliação de deformação e estabilidade do material após a extrusão sobre o próprio peso, assim como a extrusão de camadas sucessivas, que, devido à gravidade, pode haver deformação ou uma queda de camadas (Lyu et al., 2021) O controlo entre a velocidade de deposição e a resistência é determinante para prevenir o desabamento da estrutura, avaliando assim as camadas empilhadas entre si e a comparação da qualidade e as dimensões da primeira e última camada (Teixeira et al., 2023).

Aderência entre camadas: trata-se da adesão das camadas entre si, devido aos parâmetros de impressão, como a velocidade e intervalo de impressão (Teixeira et al., 2023).

Tempo aberto: consiste num período de tempo no qual ocorre uma impressão continua para uma quantidade específica de material. Esse material deve manter a maleabilidade para ser extrudido e empilhado em camadas sem deformação, assegurando uma boa adesão entre camadas (Y. Chen et al., 2020; Teixeira et al., 2023) Esse curto espaço de tempo tem a possibilidade de alterar a adesão entre camadas ou resultar na perda de propriedades de extrusão (Robayo-Salazar et al., 2023).

Estas características referidas são relevantes na escolha dos materiais para a impressão 3D. São pontos que devem ser considerados para terem uma capacidade de extrusão adequada, e assim analisar as propriedades do material, bem como os parâmetros de impressão, como o tamanho do bocal, a pressão e a velocidade (Robayo-Salazar et al., 2023).

A cerâmica, na impressão, apresenta propriedades como alta dureza, rigidez, resistência à corrosão (Rane et al., 2021), boa estabilidade térmica, fusão em altas temperaturas e resistência mecânica(Owen et al., 2018). Contudo, na realização do fabrico de componentes utilizando a técnica de impressão 3D, implica questões devido a estas propriedades. Os materiais cerâmicos são geralmente formados através de misturas de pó com ou sem aglutinantes e outros aditivos, de forma a criar a matéria-prima pré-processada antes da impressão. A cerâmica para ser impressa é categorizada à base de pasta, mas também pode ser à base de pó e sólidos a granel. Os parâmetros apresentam desafios devido à produção em massa e produtos em grande escala, por motivos da fragilidade característica e ao baixo grau de expansão do material (Z. Chen et al., 2019). As propriedades da pasta e o seu fluxo é um ponto importante que acaba por influenciar a precisão do produto e da extrusão. Os pontos que descrevem a complexidade, na reologia – estudo como o material se deforma e movimenta, como a elasticidade, fluxo, plasticidade e viscosidade – do processo da extrusão, a retenção da forma durante o processo e os parâmetros de processos (Hu et al., 2021).

O processamento industrial do material cerâmico engloba quatro fases principais: (i) a preparação da massa de forma consistente, neste caso, passível de extrusão, (ii) a formação do produto (modelagem), (iii) secagem lentamente para evitar rachaduras e (iv) o tratamento térmico, com uma temperatura adequada. A argila é um dos principais componentes da massa cerâmica e cada argila tem as suas características, sendo influenciadas diretamente em cada uma dessas fases e na qualidade do produto final. A argila com maior plasticidade requer maior quantidade de água durante a preparação, enquanto uma maior proporção de argilominerais impede o processo de secagem devido a uma menor permeabilidade (Peixoto et al., n.d.).

2.2.3. Sustentabilidade na impressão 3D

A impressora 3D adota uma estratégia, em que só é utilizada a quantidade exata de material necessário para construir um produto, de forma a ser aplicado camada por camada, de forma sucessiva. Esta abordagem reduz significativamente a quantidade de material, que noutros métodos de indústria iria acabar por haver desperdício(Lino et al., 2023). O processo tem um uso eficiente de materiais, que permite uma utilização mais económica e racional. É possível melhorar a estrutura e o design dos componentes, de modo que não seja necessário o uso excessivo de materiais, sem qualquer redução da funcionalidade ou da durabilidade (Oliveira, 2023).

A impressão 3D apresenta benefícios, devido à possibilidade de usar uma variedade de materiais, como implementar o uso de resíduos como base, fazendo com que exista uma redução no impacto ambiental e assim contribuir para o conceito da economia circular (Khan et al., 2023), de forma a reduzir uma grande quantidade de resíduos de indústria e construção e garantir uma redução da variedade de materiais que seriam necessárias para uma construção convencional (Robayo-Salazar et al., 2023), o que permite promover a reciclagem e a utilização responsável dos materiais, reduzindo assim a necessidade de extração de recursos naturais virgens.

Esta tecnologia é uma utilização cada vez mais usual como um meio sustentável. O uso dessa tecnologia potenciavários aspetos, como: a redução do impacto ambiental, ao diminuir os desperdícios; a possibilidade de imprimir o material num local preciso, permitindo reduzir a quantidade de cimento e outros matérias; a oportunidade de fazer misturas de matérias, concedendo um material mais sustentável e reaproveitamento de desperdícios; a possibilidade de criar estruturas personalizadas, sem excesso de material (Khan et al., 2023). Não só garantindo essas viabilidades, como também a sustentabilidade técnica, económica e ambiental, recomenda-se a aplicação de materiais locais ou reciclados. Esta abordagem contribui para uma redução de custos, facilita o uso de transportes nos materiais, evita possíveis atrasos e minimiza a pegada de emissões de carbono (Robayo-Salazar et al., 2023).

Em suma, a impressão 3D tem um impacto significativo na sustentabilidade, como benefícios ambientais e econômicos, que tornam este método viável e promissora. Oferece uma série de benefícios, desde a redução de resíduos, utilização eficiente de materiais como a redução da quantidade de materiais, a produção localizada e a substituição para materiais reciclados.

2.4. Pesquisa de mercado

A análise de casos de estudo envolve um processo de recolha e análise de tópicos de investigação representativos, de forma a compreender padrões comuns e orientar a tomada de decisões nas fases subsequentes do projeto.

A seleção inclui uma série de projetos, no estado de arte, baseado em aspetos da sustentabilidade, técnicas de impressão 3D e de diferentes materiais. Para além disso, os casos apresentados refletem a problemática da gestão de resíduos industriais – nomeadamente rochas naturais - e elucida possíveis soluções. Isto implica avaliar a forma como estes produtos são desenvolvidos: (i) o propósito do desenvolvimento dos projeto, (ii) o material base, (iii) a incorporação dos resíduos industriais, de forma a examinar o seu impacto na economia circular.

Functional 3D Printed Ceramics | Olivier van Herpt, (2015)

Oliver Van Herpt é um designer que apresenta uma gama de objetos de cerâmica funcional, centrada nas técnicas de impressão 3D de média e grande escala, concedendo flexibilidade nos parâmetros do design e apresentando a possibilidade de assumir e tirar proveito das imperfeições criadas durante o processo de produção, bem como a variedade de texturas e material, devido à variedade de argilas misturadas, que torna as peças singulares durante o processo de impressão (Senda, 2015). Esta coleção explora técnicas tradicionais do artesanato e a técnica moderna com tecnologia de impressão 3D, criando uma ponte entre os dois. Além disso, suaviza a precisão do design industrial, ao compilar objetos fabricados com uma demonstração de um toque humano – Tornar notável o trabalho dos artesões e produzir peças com camadas finas em parafina ou até argila impressas em 3D (Zhuang, 2015).

A impressora 3D é conhecida por ter várias vantagens no processo de indústria, como haver menos desperdícios, ser económico e, ainda, a possibilidade de criar peças complexas e geométricas. Este estudo não só permitiu essas vantagens, como também possibilitou fabricar muitas formas, texturas, cores diferentes e, assim, desenvolver um material estético, com objetos frágeis e finos (Herpt, 2013),como o projeto Sediment, que apresenta uma variedade de texturas e formas, através de diferentes seleções de argila, com diferentes propriedades, como por exemplo, a retração e a plasticidade.

O processo de mistura de faiança, resulta na criação de peças únicas (figuras 13. 14 e 15) , devido à colocação dos diferentes cores colocados em camada sobre camada, para simular um processo natural de sedimentação da terra (Herpt, 2015). O seu objetivo é reintroduzir o erro humano (figura 15) no processo de impressão, que seria um procedimento preciso e repetitivo, ou seja, a ideia é representar esses erros que acontecem num método tradicional e aplicar num método que demonstra

ser rigoroso. Durante esse processo, Oliver Van Herpt decide redesenhar a extrusora para adaptar um material mais duro, o que permitiu criar objetos mais detalhados e mais económico, devido à supressão de água, na mistura do barro (Herpt, 2013).

Figura 13: *Vasos de artesãos impressos em 3D*
Fonte: https://oliviervanherpt.com/about/

Figura 14: *Sediment, diferentes tonalidades de cor colocadas por camadas*
Fonte: https://oliviervanherpt.com/sediment/

Figura 15: *Objeto tecido com reintrodução do erro humano, 2013*
Fonte: https://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics/

Armadillo Lampshade | Drag And Drop, (2023)

Drag and Drop é um estúdio de design e produção que funde tecnologia e artesanato. Utilizam fabrico aditivo para criar designs sustentáveis, com precisão e qualidade, recorrendo ao uso WASP 3MT para impressão em cerâmica e o Grasshopper, um software de modelação 3D, para gerar formas complexas por meio de parâmetros. Apresenta projetos que se destacam pela aplicação de técnicas tradicionais à impressora 3D. Estes incluem os seguintes: (i) kilim, (ii) Bulky, (iii) Sepals.

Kilim é um projeto (figura 16) inspirado nas técnicas tradicionais de tecelagem de tapetes de método oriental. Uma textura de superfície com reinterpretação contemporânea da técnica de tecelagem kilim (Drag And Drop, 2023) de ponto duplo e bordado(Pires, 2018). Uma peça cilíndrica fina, impressa em 3D em barro e acabamentos feitos à mão. O vaso é composto por argila 100% natural e tem um exterior mate e um interior esmaltado(Drag And Drop, 2023).

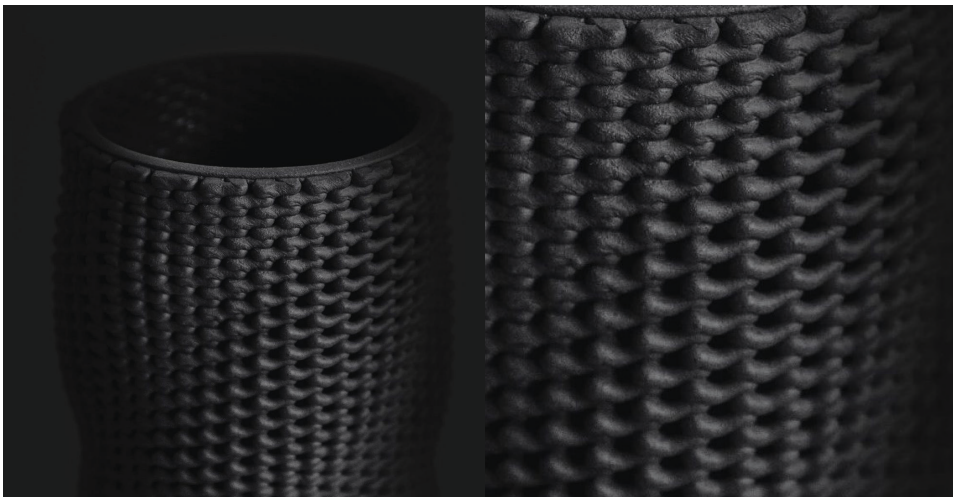


Figura 16: *Técnicas tradicionais de tecelagem de tapetes (Kilim)*
Fonte: https://www.3dwasp.com/vasi-in-argilla-stampati-in-3d-da-drag-and-drop/

Bulky, (figura 17) é uma compilação de técnicas de tecelagem, caraterizado por uma silhueta geométrica simples e uma textura de malha que lembra os tecidos. Foi concebido como um conjunto de três peças com alturas variáveis e uma textura projetada para interagir com a luz ao longo do dia. O material é 100% argila natural, com um exterior mate e um interior esmaltado(Drag And Drop, 2023).

Figura 17: *Textura tricotada (Bulky)*
Fonte: https://www.3dwasp.com/vasi-in-argilla-stampati-in-3d-da-drag-and-drop/

O projeto Sépalas (figura 18) foi inspirado na natureza. É uma jarra inspirada no processo natural da evolução dos botões de flores, que incorpora uma textura orgânica que lembra as escamas protetoras, escamas essas que funcionam como um escudo, que salvaguarda a flor, à medida que a flor cresce. O botão abre-se gradualmente e permite que a flor surja. É um design que incorpora a beleza e a elegância de uma flor que emerge do seu botão (Drag And Drop, 2023).

Figura 18: Botões de flores (Sépalas)
Fonte: https://draganddrop.design/collections/3d-printed-ceramic-vases

KERAMIC | Alessandro Severi, (2023)

O estúdio grego Keramic (figura 19) concebe e produz uma gama de produtos ecológicos e funcionais. O material base é a argila cerâmica/porcelana, com recursos apropriados à tecnologia de design 3D e de fabrico aditivo. O objetivo da empresa é combinar duas ideias: tradição e tecnologia. O resultado pretendido é um artesanato de caráter que represente a evolução da tecnologia no design e que, mesmo assim, compile com a tradição. A empresa produz uma gama diversificada de produtos, incluindo mesas, mobiliário, candeeiros e objetos decorativos, com o material cerâmico. O fator da identidade dessa aplicação torna-se numa identidade da empresa. O valor do material é aumentado através do fabrico aditivo, que permite precisão, redução de resíduos e um nível de singularidade que não é possível obter através de métodos convencionais. Além disso, este recurso permite oferecer opções de fabrico mais rápidas e económicas (Severi, 2023).

Figura 19: Material inspirado na natureza (Rosebud)
Fonte: https://www.3dwasp.com/mobili-e-prodotti-di-design-stampati-in-3d-in-ceramica-con-keramik/

Brick Clay Carafe & Cups | UNFOLD, (2018)

A Unfold desenvolveu chávenas de jarros de argila de tijolo proveniente do rio Maas, que devido à variedade de material (figura 20) é possível após a cozedura variar de cor. Na fase de cozedura, são utilizadas baixas temperaturas, para adquirir a cor de tijolo, mas de forma a ficar num tom vermelho escuro, roxo e num tom aproximado do preto, é implementado 1.200 graus Celsius (Warnier & Verbruggen, 2018). O projeto reutiliza desperdícios de tijolos, conhecidos por possuir resistência e baixa porosidade, para beneficiar a estabilidade do produto e dessa forma, também reduzir a contaminação do desperdício (Wienerberger, 2024). Tem uma abordagem que realça o potencial dos tijolos cerâmicos e destaca a economia circular.

A argila é o material base, que incorpora subprodutos e resíduos de indústrias (demolições e reabilitação de edifícios), para depois passar pelo processo de cozedura, dando assim uma segunda vida ao material. O design, é inspirado nas técnicas tradicionais de ondulação, mas implementadas na técnica da impressão 3D, que apresenta um método de software, afastando a estética convencional da impressora 3D (Warnier & Verbruggen, 2018)

Figura 20: *Taça com variedades tons, devido a variedades temperaturas*
Fonte: http://unfold.be/pages/bokrijk-ware.htm

TECLA | Mario Cucinella Architects, (2021)

Tecnology and Clay 3D Printed House (TECLA), é uma habitação eco-sustentável impressa com argila e terra crua, um material biodegradável que evita os resíduos de construção (IMPRESORAS3D, 2021). Este modelo (figura 21) é um projeto de habitação circular, que conjuga a construção tradicional com a tecnologia impressão 3D, dando destaque à arquitetura vernacular, com materiais naturais e locais. Além disso, devido à utilização locar, permite a redução de resíduos e entulhos, com baixo teor de carbono. O TECLA, é composto por um material como base a terra,que corresponde às demandas básicas locais, como o clima, a necessidade de isolamento e ventilação (Pintos, 2021).

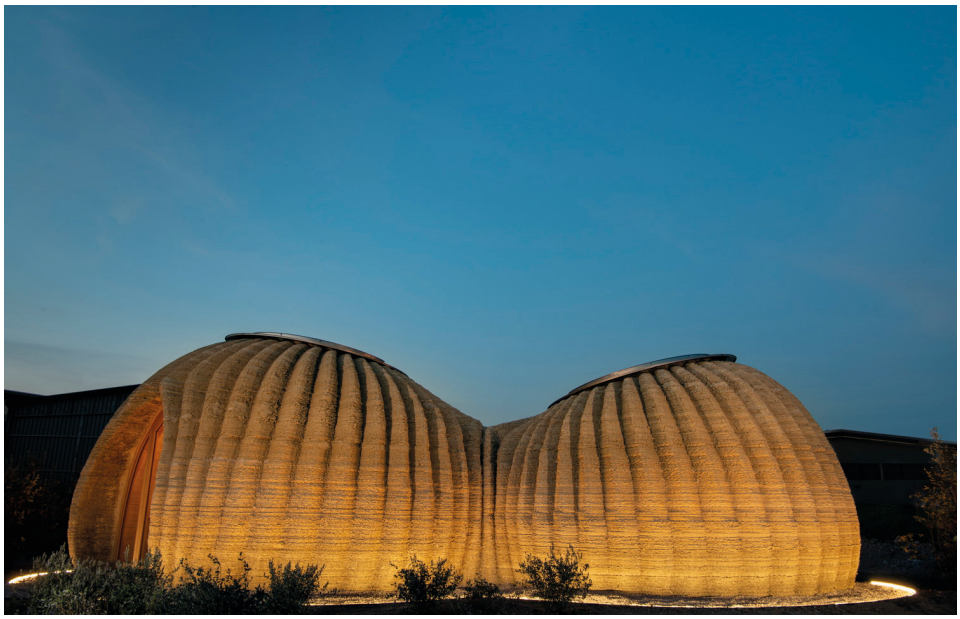


Figura 21: *TECLA*
Fonte: https://www.archdaily.com.br/br/960943/casa-impressa-em-3d-com-tecnologia-tecla-mario-cucinella-architects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

TOVA | Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC), (2022)

A TOVA (figura 22) é um projeto semelhante de TECLA, desenvolvido por Mario Architects, com uma colaboração com WASP. O protótipo é uma ligação entre a arquitetura vernacular de barro – uma construção tradicional feita de argila, areia, água e, por vezes, materiais orgânicos como palha, caraterizado pela dependência de materiais e técnicas de construção disponíveis localmente – e a tecnologia de impressão 3D. Aborda os problemas globais, com uma análise do solo, que garante atingir um material adequado em percentuais de argila e água, para a integridade estrutural e a elasticidade. A base de geopolímero e telhados de madeira, são adaptados com um revestimento impermeável de matérias-primas como a clara de ovo, que assegura a durabilidade em diversas condições ambientais. Para evitar o excesso de emissões de CO2, responsáveis por 38% de energia, os materiais foram adquiridos num raio de 50 metros, para, além disso, minimizar os resíduos (Sousa, 2022).

O método e o sistema de impressão 3D facilitam o acesso mais direto à habitação em áreas ou locais suscetíveis de vulnerabilidade. Obtendo também edifícios mais complexos e a possibilidade reduzir o impacto ambiental que a construção costuma ter. As paredes são idealizadas com juntas em ‘T’ e ‘L’, em vez de linhas retas, tendo em conta as condições climáticas, com uma incorporação de cavidades para gerir a movimentação do ar, ou seja, permitindo o isolamento, retenção de calor e proteção da luz solar (Sousa, 2022).

Figura 22: *TOVA*
Fonte: https://images.adsttc.com/media/images/631f/4370/115d/8a49/dc8a/73fb/medium_jpg/casa-e-impressa-com-terra-babosa-e-clara-de-ovo-em-sete-semanas_3.jpg?1662993272

Reprint Ceramics | Coudre studio, (2020)

Reprint Ceramics (figura 23) é uma linha de candeeiros impressos em 3D com design paramétrico e algoritmos para gerar formas complexas, criados a partir de cerâmica reciclada. O projeto integra uma técnica em argila (barro) do Coudre Studio, com a visão de reciclar desperdícios da Fabrique Publique (Nieves et al., 2020). A implementação de cerâmica Remake dedica-se à reutilização de fragmentos, evitando assim da incineração de resíduos e na criação de novos produtos através do Design. O primeiro estudo com cerâmica reciclada derivou entre 5% e 10% de materiais reciclados. Posteriormente, foram avaliadas umas percentagens mais elevadas, tendo em conta os tipos de granulometria, cores, proporcionado com argila de porcelana e grés. Em relação às propriedades dos materiais, o "*Material District*" carateriza os materiais, como: um brilho e textura variável; uma boa resistência ao fogo e ao risco (Material District, 2019).

O projeto (figura 24) reforça a ideia da utilização de resíduos na redução de custos, minimizando o consumo de matérias-primas e mostrar enfase à melhoria da sustentabilidade ecológica, no reutilizar dos resíduos pós-industrial e pós-consumo, implementados em objetos novos. O Coutre Studio, assume a ideia de um estúdio de artesanato pós-digital, com peças personalizadas e não padronizadas, com o método de impressão 3D artesanais. Devido a esse mecanismo, acaba por tornar as peças artesanais exclusivas. A extrusão é realizada através de várias fórmulas de argamassas ao longo da mistura, efetuadas manualmente, resultando de percursos de ferramentas digitais e agência de materiais (Nieves et al., 2020).

Figura 23: Linha de candeeiros paramétrico e algoritmos
Fonte: https://coudre.studio/projects/reprint-ceramics/

Figura 24: Cerâmica reciclada de 5 e 10% de Remake Ceramics
Fonte: https://materialdistrict.com/material/remake-ceramics/

Structural columns | DART Lab, Mania Aghaei Meibodi, (2023)

DART Lab desenvolveu um projeto biodegradável (figura 25), a partir de desperdícios de serradura, para reduzir os resíduos de madeira com a compilação de betão. Foi elaborado através do projeto BioMatters, com um material composto de serradura, biopolímeros e aditivos, permitindo uma argamassa para imprimir e até fazer moldes de betão (Eberhardt, 2023). A equipa recorre à impressão 3D robótica para desenvolver cofragens de madeira, como um método que permite produzir zero desperdício. Após a cura do betão, a cofragem é triturada e desidratada de forma a reciclar o desperdício (Adams, 2023).

DART Lab decidiu criar uma coluna de 1,8 metros, preenchida com o betão e a reutilização do material de serradura, que foi utilizada como molde, sendo removido assim que o betão endurecer. Após esse processo, a serradura que servia como molde é reciclada com adição de água para restaurar a viscosidade do material e ter a possibilidade de imprimir de nossa na impressora 3D. A equipa afirma que 40% dos gastos de construção de betão é utilizada madeira, por isso, o projeto responde ao impacto ambiental dos resíduos de madeira no meio da construção, oferecendo uma solução sustentável para reduzir a quantidade excessiva que vai acabar ao aterro e poluição (Eberhardt, 2023).

Figura 25: CColunas estruturais impressos
Fonte: https://www.dezeen.com/2023/07/31/dart-lab-biodegradable-concrete-casting-sawdust/

3D printed Earth Wall | IAAC e WASP, (2019)

O IAAC (Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha) e o WASP lançam um protótipo (figura 26) de uma parede em impressão 3D, com base no domínio da construção em fabricação aditiva. Este projeto tem como bases projetos anteriores, e visa aumentar a promoção da construção através de impressão 3D diretamente no local e a abrir portas às possibilidades do design. Procura propor soluções de habitações sustentáveis, de forma mais económica, parcialmente contruídas pela comunidade, centrando-se no desenvolvimento urbano. Com os avanços na tecnologia de impressão 3D, apresenta-se como uma estratégia viável na construção, proporcionando um progresso na indústria. O protótipo é feito em escala real que consiste numa parede de 40 com de espessura, em que implementa elementos de madeira com a função de escada e na argamassa composta por argila e fibras de arroz, com o objetivo de ter uma de terra resistente (Say, 2019).

Figura 26: *Protótipo 1:1*
Fonte: https://parametric-architecture.com/3d-printed-earth-wall-with-embedded-staircase-wasp-iaac/

New Delft Blue | Studio RAP (2023)

O projeto “New Delft Blue” (figura 27) é uma reinterpretação moderna da tradicional cerâmica de porcenala Delft Blue (pintura azul sobre fundo branco) para criar um par de arcos, que combina algorítmico e impressão 3D (braço mecânico), peças de cerâmica que exploram novas formas e padrões impossíveis de serem feitos manualmente (Ravenscroft, 2023).Esta fusão de artesanato e tecnologia é uma reinterpretação contemporânea da cerâmica Delft Blue, de forma a revelar um potencial arquitetónico de ornamentação de cerâmica. Os padrões são inspirados na natureza, que têm cerca de 3000 azulejos cerâmico, permitém criações únicas, com aplicações de um esmalte azul transparente que resulta em tons variados de azul nas formas convexas e côncavas (Ibrahim, 2023).

Figura 27: *Azulejos New Delft Blue*
Fonte: https://amazingarchitecture.com/storage/files/1/architecture-firms/studio-rap/new-delft-blue/new-delft-blue-studio-rap-netherlands-18.jpeg

Ceramic House | Studio RAP, Ter Hall, (2023)

O Studio RAP desenvolveu uma fachada (figura 28) de cerâmica "ondulada", usando impressão 3D para criar uma nova expressão arquitetónica. Baseado em algoritmos de design digital, o projeto explora a decoração da fachada original e complementa com o design da cerâmica vidrada. Ter Hall afirma que a fachada muda à medida do olhar do observador, ou seja, cada vez que observador se aproxima apresenta diferentes ângulos, tendo sempre a ideia da ilusão. Os azulejos cerâmicos têm a peculiaridade de ser impressos todos de maneira diferente e individual, com o foco de destacar o detalhe das texturas do artesanato têxtil, inspirados nas malhas, os seus vincos/dobras, os padrões dos pontos e fios entrelaçados, criando assim texturas. Esta ideia surgiu da ampliação da identidade de uma loja de moda de topo de gama, numa fachada que para além da função de revestimento, tem um sentido estético. A fachada é dividida em dois: o piso do rés do chão com azulejos de cerâmica; e o piso superior compostos por "tijolos" impressos em 3D, com várias tonalidades, com uma junção de aço inoxidável cortados a laser, para permitir um encaixe entre as peças. A ideia da integração desta tecnologia com o artesanato concede uma ideia arrojada à estrutura (Donaldson, 2023). A cerâmica é um material que apresenta durabilidade, isolamento térmico, acústico, resistente a altas temperaturas e à corrosão, o que é vantajoso na implementação deste material na fachada.

O Studio RAP apresenta uma autonomia e adaptabilidade, ao aproveitar um método de criação diferente, através de algoritmos de design digital e implementar na impressão 3D, de forma a demonstrar a combinação do design e fabrico digital, mantendo os valores tradicionais do artesanato (McGuickin, 2023).

Figura 28: Azulejos em três tons de vermelho e dois tipos de fachada
Fonte: https://www.dezeen.com/2023/11/29/rap-studio-3d-printed-ceramic-tiles-facade-rippling-textile/

Seed Stitch Wall | Emerging Objects (2016)

O seed Stitch (figura 29) é um protótipo de revestimento de parede cerâmico impresso em 3D, inspirado em superfícies tricotadas. Cada azulejo apresenta uma textura com caráter complexo, que permite a influência da mão, gravidade, temperatura, para produzir diferença. Os azulejos são pendurados numa estrutura de metal galvanizado (figura 26) ou numa base impressa em 3D, permitindo efeitos de iluminação e isolamento térmico (Rael et al., 2016). Isto é possível graças à curvatura do material, que permite a fixação externa dos edifícios. A utilização de moldes J-metal facilita uma montagem rápida e simples. Este projeto é manipulado gcode para produzir textura de superfícies de malha, como o ponto semente – malhas simples e as pequenas saliências purl. O gcode é utilizado para regular o movimento de cada linha de argila durante o processo de impressão 3D, criando textura circular no qual aproxima à forma das sementes espalhadas pela superfície. Este projeto é implementado na cabana de jardim, em Oakland, Califórnia, numa estrutura com azulejos cerâmicos que suportam suculentas. O projeto demonstra como a impressão 3D pode ser aplicada na arquitetura para criar espaços pequenos e ecológicos. O design é texturado e vivo, combinando design moderno e sustentabilidade (McKnight; Jenna, 2018). Este projeto não só aplicou a estética, como também deu funcionalidade ao azulejo.

Figura 29: Azulejo com estrutura de metal e suporte de plantas
Fonte: https://emergingobjects.com/project/seed-stitch/; https://emergingobjects.com/wp-content/uploads/2018/03/Rael_San_Fratello-3D_Printed_Cabin-C0920.jpg

Book Cabin Exposed | Xu Weiguo´s Team (2021)

O projeto “Book Cabin Exposed” (figura 30) é uma construção com impressão 3D (técnica robótica) em betão. A estrutura combina design paramétrico em tecnologias avançadas, que passa por uma impressão e direciona códigos e algoritmos, de forma a destacar a eficiência e sustentabilidade. A impressão 3D é feita camada por camada, reduz o uso de materiais e o tempo de construção, demonstrando o potencial desta tecnologia em criar arquiteturas funcionais e estéticas. Este método permite formas irregulares e assegura alta qualidade na construção.

A cabine de livros é feita de betão de fibra, com a habilidade de eliminar a utilização de barras de aço e cofragem, permitindo assim a moldagem de toda a estrutura esférica. É possível devido à utilização de dois conjuntos de braços robóticos, no processo de construção, que foi subdividida na impressão da estrutura principal e o outro conjunto pela pré-impressão da parede em arco e do telhado. A parede da cabana tem uma estrutura oca preenchida com argamassa de isolamento térmico, proporcionando um isolamento eficiente. O edifício tem duas texturas diferentes: uma laminada, obtida por impressão laminada, e outra com uma textura artesanal tecida na parede lateral junto à entrada (Ranjit, 2021).

Figura 30: *Textura laminada e artesanal na parede lateral*
Fonte: *https://parametric-architecture.com/3d-printed-concrete-book-cabin-exposed-by-professor-xu-weiguos-team*

The Elaboration | Alterfact Studio, Korea Ceramic Foundation, (2016)

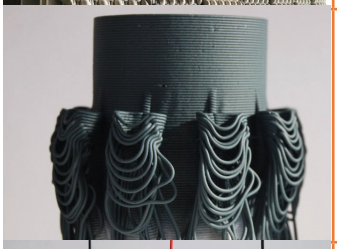
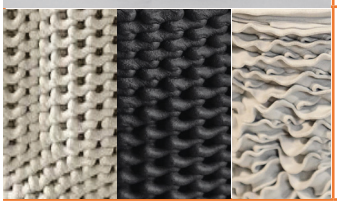
Elaboration da Alterfact (figura 31), cria uma linha de vasos que investe no conceito entre a técnica da cerâmica na impressora 3D e a tradição no artesanato cerâmico. Os objetos evoluem a partir de um tubo que extrude de forma a demonstrar o potencial da impressora, como a especiosidade do material. Esta coleção exemplifica e demonstra a precisão da impressão na produção industrial e a complexidade artesanal feitos à mão. Suscita a reflexão sobre autoria e a interseção entre esses dois pontos, a tecnologia e o artesanato, que trabalha a partir dos detalhes de forma casual e a estética industrial, com a implementação da essência do artesanato (Nair Sarangi, 2023).

Figura 31: *Potencial da impressora de cerâmica*
Fonte: *https://www.alterfact.net/elaboration*

Tabela 2: *Síntese de caso de estudo de resíduos aplicados em Impressão 3D*

Empresa/projeto		Produto	Material Base	Resíduos	Propósito
	IAAC Tova	Residências	Vernacular de barro	Palha	Geração de resíduo zero alternativa habitacional
	DART Lab Structural coumns	Coluna	Betão	Madeira, biopolímeros e aditivos	Desenvolver cofragens de madeira de forma a reduzir material ao aterro
	IAAC e WASP 3D printed Earth Wall	Protótipo de uma parede	Terra e Argila	Fibra de arroz	Propor soluções de habitações sustentáveis, de forma mais económica
	Xu Weiguo´s Team Book Cabin Exposed	Cabine de livros	Betão	----	Eliminar a utilização de barras de aço e cofragem
	Mario Cucinella Architects TECLA	habitação eco-sustentável	argila + terra crua	----	redução de resíduos e entulhos
	Brick Clay Carafe & Cups UNFOLD	Chávenas e jarros	Argila	Tijolo	Reduzir a contaminação do desperdício

Tabela 3: *Síntese de caso de estudo do material cerâmico em impressão 3D*

Empresa/Projeto		Produto	Material Base	Propósito do Produto
	Studio RAP New Delft Blue	Azulejos	Porcelana	Revelar um potencial arquitetónico de ornamentação de cerâmica
	Studio RAP Ceramic House	Azulejos	Cerâmica	Destacar o detalhe das texturas do artesanato têxtil, inspirados nas malhas
	Emerging Objects Seed Stitch Wal	Azulejos	Cerâmica	Revestimento de parede
	Alterfact Studio The Elaboration	Linha de vasos	Cerâmica	Interseção entre esses dois pontos, a tecnologia e o artesanato
	Coudre Reprint Ceramics	Linha de candeeiros	Cerâmica reciclada	Exploração do material para redução de resíduos
	Keramic Rosebud	Candeeiro	Porcelana	Combinar artesanato e natureza com a tecnologia
	Olivier van Herpt Functional 3D Printed Ceramics	Vaso	Cerâmica argila	Técnica da reintrodução do erro humano
	Armadillo Lampshade	Vasos	Cerâmica argila	Implementar a técnicas tradicionais

A partir da análise da tabela-síntese de pesquisa de mercado, torna-se possível perceber que não é usual a implementação de resíduos no material cerâmico, em que o foco seja incorporar na impressão 3D. Essa reutilização é mais presente no cimento, com uma incorporação de matérias-primas convencionais (fibra de arroz e palha), polipropileno, biopolimeros, tijolo e aditivos. O material cerâmico tem mais presente o propósito da incorporação das técnicas tradicionais na tecnologia de impressão 3D. Abordando mais a parte da técnica, que envolve mais a modelação 3D e experimentos do funcionamento da extrusora, as suas aplicações são usuais no artesanato, enquanto o cimento é mais direcionado ao uso arquitetónico/construção civil. A incorporação de resíduos de ardósia em material cerâmico é, portanto, considerada uma via promissora a explorar. Isto deve-se não só à redução dos resíduos gerados durante o processo de produção, mas também ao potencial de incorporação de uma textura dinâmica e detalhadas.

Capítulo 3

Caso de Estudo

3. Caso de Estudo

O Capítulo Caso de estudo teve como ponto de partida a exploração do potencial do resíduo de ardósia no contexto da problemática do desperdício de industrial, com um desenvolvimento de planos experimentais, que beneficiaria o impacto ambiental e a possível impressão numa impressora 3D.

Os resíduos selecionados – pó de ardósia, pó de tijolo, borra de café, granito, pó de mármore – foram escolhidos devido às quantidades consideráveis de desperdício industrial, durante a extração e o tratamento do resíduo. Também foram selecionados – casca de ovo, serrim e casca de arroz – pelo facto de ser um estudo de sustentabilidade e materiais alternativos na produção cerâmica que remete para a utilização de resíduos orgânicos. Estes resíduos visam uma melhoria de propriedades das amostras e, assim, também reduzir o impacto ambiental. Para o efeito, foram levados a cabo uma série de testes e exploração da retração do estado "verde" das amostras para a fase de cozedura a altas temperaturas, procurando selecionar e fazer aplicações para os materiais com melhores resultados.

Objetivos gerais:

- Desenvolver materiais a partir da exploração das propriedades de resíduos de pó de ardósia e na adição de cerâmica, com o objetivo de permitir que o material seja possível de imprimir na impressora 3D por extrusão.

Objetivos específicos:

- Uma análise crítica dos resultados dos planos experimentais, com base numa metodologia estruturada que inclui várias fases, nomeadamente: (i) compreensão do material; (ii) estudo do material; (iii) processo de comportamento térmico; (iv) calibração; (v) impressão.

- Desenvolvimento de módulos para a criação de um painel com a incorporação de um módulo de jardim vertical a partir do material selecionado, após a fase experimental estar concluída e implementar o material na impressão 3D.

No presente Capítulo apresenta-se um breve estudo preliminar onde se pretendeu avaliar a viabilidade de utilização de resíduos e o desperdício de ardósia, resíduo esse gerado na empresa de Lousa de Valongo. São apresentadas etapas que serão desenvolvidas de forma a criar um estudo organizado e conciso, com base no processo de *Material Driven Design* ('MDD'), de forma a desenvolver o material e de seguida aplicar esse material num produto. Dar-se-á início a compreensão do material, com uma abordagem das caraterísticas técnicas e as suas limitações; o estudo do material e calibração, que permite o desenvolvimento do material, com a presença de subcapítulos, com várias etapas de planos experimentais; o processo de cozedura, sendo que é um material cerâmico, tem a necessidade de avaluar a temperatura de cozedura; e, por fim, a impressão, com o estudo de extrusão do material selecionado (estará presente no capítulo 4).

3.1. Plano experimental

O plano experimental baseia no seguinte: (i) estabelecer uma metodologia que permita o desenvolvimento de novos processos – através da realização de vários testes; (ii) analisar as propriedades e a viabilidade do material derivado de resíduos, oferecendo um caminho sistemático para a transformar desperdícios em novos materiais, permitindo avaliar as propriedades e o potencial do material com aplicação na impressora 3D.

Este método de testes consolida a redução de desperdício industrial, introduzindo o resíduo de ardósia. São testadas várias proporções de materiais, de modo a criar um material viável, que permita a redução do consumo de matérias-primas virgens. Adicionalmente, obteve-se uma avaliação de vários tons e texturas.

Este plano experimental é estruturado nos seguintes termos:

Etapa 01 – Compreensão do material (Caraterização técnica e experimental): esta caraterização permite a compreensão das suas qualidades, defeitos e possíveis aplicações práticas no material base, a cerâmica e o desperdício de ardósia. A nível técnico, permite verificar as propriedades dos materiais, as suas limitações/oportunidades e como o material poderá reagir com a cerâmica.

Etapa 02 – Estudo do material: nesta etapa é desenvolvida uma variedade de amostras, com quantidades de materiais diferentes. Estas passaram por um plano de estudo inicial (realizado como anteprojeto) e uma continuação com a implementação de mais materiais. As amostras foram avaliadas pelos critérios de impressão 3D: extrudabilidade (filamento uniforme); capacidade de construção (estável e camadas estáveis); capacidade de impressão (manter a extrudabilidade e a capacidade de construção durante o tempo de impressão). Após esta análise, existe uma seleção de amostras para passar para o processo de cozedura, conhecida por "chacota".

Etapa 03 – Processo de comportamento térmico: este processo avalia diferentes temperaturas e a quantidade de retração que é feita em estado "verde", bem como a retração que é provocada depois da cozedura. Além disso, também explora a textura e diferentes tonalidades de cor.

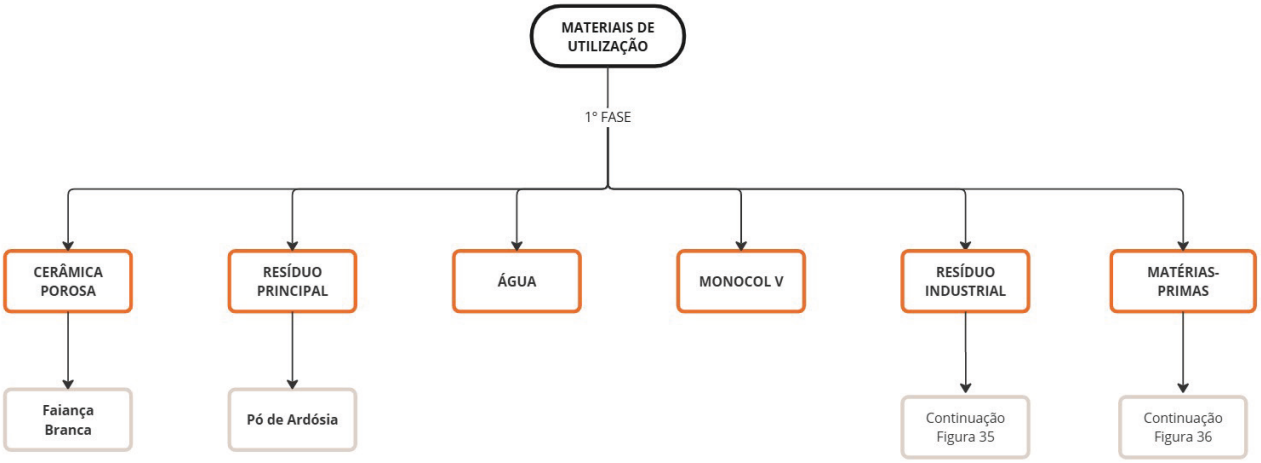
Etapa 04 – Calibração: nesta fase é necessário avaliar o funcionamento da impressora com o material selecionado, produzida através cerâmica (faiança branca), pó de ardósia, pó de tijolo e água. Essa análise tem em mente a fluidez necessário do material, a viscosidade, a velocidade de impressão, a retenção da forma e a plasticidade.

Etapa 05 – Impressão: depois de uma análise, é realizada a impressão do produto desenvolvido, com o material selecionado, que apresenta com melhores resultados. Esse produto e desenvolvido com o objetivo de demonstrar conclusões que serão abordadas no capítulo seguinte. O produto foi desenvolvido através de um processo que envolveu não só a impressão, mas também a modelação 3D desenvolvida num software chamado Rhinoceros, proprietário de modelagem tridimensional

3.1.1. Etapa 01 – compreender os materiais

Nesta etapa foi feita uma seleção dos materiais que pudessem ser mais benéficos para a criação de um novo material e que fosse compatível com a impressão 3D *"Delta wasp 40100 Clay"* – uma impressora que dá para incluir misturas cerâmicas como a argila, porcelana, faiança e grés, um material base de impressão. Como ponto de partida, foi investigado: (i) uma cerâmica porosa – faiança branca – que se encontra no estabelecimento académico *"Universidade do Porto"*; (ii) o resíduo principal – pó de ardósia – recolhido na empresa de *"Lousa de Valongo"*; (iii) um ligante como o Monocol V, uma resina acrílica; (iv) pó de tijolo; (v) borra de café. O plano experimental foi estruturado em fases distintas. A fase inicial consistiu em achar amostra base (figura 32), seguido de estudo dos resíduos industriais (figura 35) e, posteriormente, de uma análise dos materiais convencionais (figura 36).

Figura 32: *Esquema representativo dos materiais de utilização*
Fonte: *Autora, 2024.*



Primeiramente, descrevem-se os materiais utilizados, realçando as caraterísticas físicas e químicas dos materiais principais, concretamente o pó de ardósia e a faiança branca, que são apresentados na primeira fase do plano experimental, com o objetivo de obter uma amostra base, permitindo dar uma continuação à implementação de novos materiais que possam ser benéficos.

De seguida, apresenta-se a caraterização das próximas implementações, de forma a se refletirem as suas limitações/oportunidades como o material base.

3.1.1.1. Cerâmica – Faiança

A faiança branca é um material cerâmico (figura 33) poroso e opaco, com uma superfície branca. É um material que permite uma longa vida útil e, para além disso, pode ser reutilizado em novos produtos. É um material que é composto por argila e recursos minerais como o feldspato e areia.

Este material, em termos de durabilidade, demonstra bons resultados, sendo, no entanto, menos resistente que a procelana (Artes, 2024a; Touogam Touolak & Tchangnwa Nya, 2014), um dos materiais que poderia ser possível de implementar no estudo. Este material em específico, foi selecionado devido as suas caraterísticas e á facilidade de acesso na instituição académica.

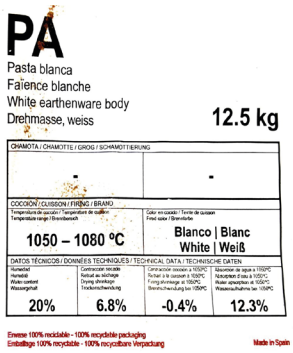


Figura 33: *Propriedades da faiança*
Fonte: *Autora, 2024.*

Caraterísticas técnicas:

- A temperatura de concessão vai dos 1050ºC a 1080ºC;
- Apresenta uma cor branca;
- É composta por uma humidade de 20%;
- A retração de secagem de 6.8%;
- A contração de cozedura -0.4% com a temperatura de 1050ºC;
- Absorção de água de 12.3% a 1050ºC (Artes, 2024b);

3.1.1.2. Pó de ardósia

Como referido anteriormente, o pó de ardósia (figura 34) foi obtido através da empresa ELV (Empresa de Lousa de Valongo). Este material é bastante poroso, compacto e fino, pelo que no que toca à granulometria não houve a necessidade de passar pôr uma peneira e dividir, sendo que varia entre 0,03 a 0,075 mm (30 a 75 micrômetros) de granulometria.

Figura 34: *Pó de ardósia*
Fonte: *https://pt.made-in-china.com/co_njpurda/product_Ral-7015-Slate-Grey-Powder-Coating-Powder_rrgyssssg.html*

Resumindo a abordagem mencionada no capítulo 2 referente à ardósia, este material possui as seguintes características: (i) resistente à flexão; (ii) apresenta estabilidade e durabilidade; (iii) rugosidade intrínseca.

3.1.1.3. Resina acrílica

O monocol V é uma resina acrílica, com alta viscosidade, que permite aderir as barbotinas – suspensão aquosa de argila com partículas moídas, composta por argila e água – e esmaltes. O material permite que seja fácil manusear a peça, retarda a secagem – o que tanto pode vir a ser uma vantagem ou desvantagem - e permite que seja mais flexível e mais homogêneo (MONOCOL V, 2024). A resina acrílica foi implementada com o objetivo de criar um ligante que permitisse criar mais resistência e fluidez à peça, proporcionando facilidade de impressão. Porém, deixa questões em relação à sustentabilidade, e muito embora apresente propriedades que demonstrem durabilidade e resistência – água, UV e desgaste – é preciso pensar nas questões técnicas, tendo presente como base a resina acrílica e a composição de pigmentos, resinas e aditivos (MONOCOL V, 2024) que permite dar resistência ao material cerâmico.

O Monocol v foi inicialmente incorporado, mas devido ao seu impacto ambiental negativo, foram explorados materiais – pó de mármore, casca de arroz e casca de ovo – alternativos que pudessem cumprir as mesmas características técnicas.

Caraterísticas técnicas:

- Densidade aproximadamente 1,5 a 1,8 kg/L;
- Durabilidade;
- Resistência à água, UV e ao desgaste;
- Acabamentos fosco, semi-brilho ou brilhante (dependendo da aplicação);
- Flexibilidade (MONOCOL V, 2024)

3.1.1.4. Desperdício industrial

Foi pensado em implementar desperdício de indústria de forma a reduzir os resíduos, como o pó de tijolo e rochas ornamentais (granito e mármore), devido às suas caraterísticas e a seu impacto. Os resíduos mencionados são provenientes dos processos de fabrico e transformação da pedra, como já foi referido no subcapítulo 2.1.1.1. (método de extração local) sobre resíduos industriais, processos de pós-corte, modelação e polimento. Estes resíduos (figura 35) foram de fácil acesso, devido à sua recolha no estabelecimento académico *"Universidade do Porto".*

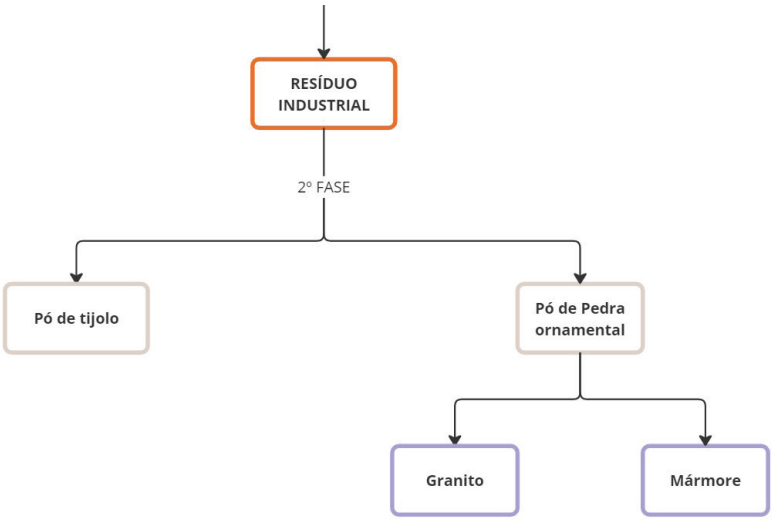


Figura 35: *Esquema representativo do resíduo industrial*
Fonte: *Autora, 2024.*

O pó de mármore é um resíduo extraído das pedreiras. A sua composição resulta de uma combinação de pó e de granulometrias finas e grossas, consoante os métodos de transformação utilizados. O material é composto principalmente por carbonato de cálcio, que apresenta propriedades como:

- elevada durabilidade;
- resistência à água;
- redução da taxa de retração;
- alta resistência à rotura;
- baixa densidade, porosidade e dureza. (Moreira et al., 2008)

3.1.1.5. Matérias-primas convencionais

Os materiais convencionais foram concebidos com o objetivo de aumentar a resistência do material, reduzir o seu peso e como anteriormente mencionado desenvolver um substituto para o monocol V. A resina pode ser considerada uma desvantagem para a economia circular.

Na primeira fase do estudo ainda foi incorporada borra de café, que apresenta caraterísticas como a elevada retenção de água devido à sua estrutura porosa, baixa densidade e termo estabilidade numa vasta gama de temperatura (Hossain & Roy, 2020). Este facto pode ser vantajoso em termos de redução do peso do material após o processo de cozedura, potenciando uma vantagem na incorporação num produto.

As caraterísticas dos aglomerados borra de café resultam na criação de poros adicionais no material cerâmico, o que resulta (i) num material com menor densidade durante a queima, (ii) numa maior porosidade, o que contribui para a melhoria do isolamento térmico e maior absorção de água, e (iii) na possível diminuição de resistência mecânica (Andreola et

al., 2019; Sena da Fonseca et al., 2014).

A implementação da borra do café pode ser vantajosa em aplicações como tijolos e outros matérias de construção, devido ao tal aumento de porosidade e propriedades de isolamento térmico.

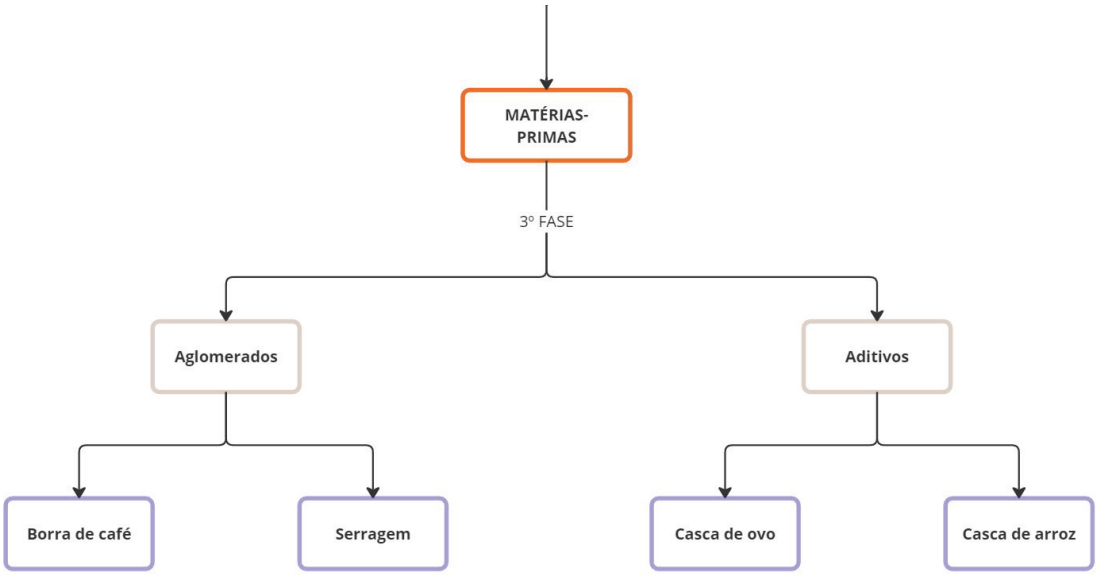


Figura 36: *Esquema representativo dos materiais de utilização*
Fonte: *Autora, 2024.*

Na segunda fase foi implementado outro tipo de resíduo, a serragem (triturada e peneirada), que demonstra ter uma alta absorção de água, o que pode afetar o processo de secagem da cerâmica. A densidade do próprio desperdício de serragem influencia o peso da cerâmica, conforme a porosidade introduzida no material.

No contexto cerâmico, a serragem é um material que resulta numa melhoria na resistência térmica, mas também numa diminuição da sua condutividade térmica e, ao mesmo tempo, reduz a sua densidade(Charai et al., 2020), o que provoca num material mais leve.

Estudos afirmam que tanto a borra de café como a serragem reduzem a resistência mecânica da cerâmica, mas que pode ser ajustada dependendo da quantidade adicionada.

Figura 37: *Casca de ovo*
Fonte: *Autora, 2024.*

A casca de ovo (figura 37) é principalmente constituída por carbonato de cálcio e a membrana proteica. É um resíduo abundante na indústria alimentar. Estima-se que na Europa são produzidas cerca de 150 000 toneladas de casca de ovo, que são direcionadas para o aterro todos os anos (Vazquez et al., n.d.).É um material que apresenta: (i) ligeira porosidade; (ii) densidade baixa, o que permite um material mais leve;

(iii) apesar de ser um material que demonstra ter rigidez, a casca de ovo é fácil de triturar, devido ao impacto. É um resíduo que é bastante reutilizado nas indústrias, como na agricultura e tratamentos de água e na fabricação de materiais compósitos (Vazquez et al., n.d.). A cerâmica é uma delas, demonstrando um aumento de resistência à flexão, sem prejudicar as outras características técnicas (coeficiente térmico linear, perda de massa, retração de queima, absorção de água, densidade, coordenadas de cor) do material (Vilarinho et al., 2022).

A casca de arroz (figura 38) é um resíduo agrícola, composto em sílica (Arranz et al., 2021), como possíveis agentes formadores de poros (Dele-Afolabi et al., 2018) no material cerâmico. Além disso, é um material de isolamento térmico, devido à sua baixa condutividade térmica e à densidade e absorção de água ser variada conforme os métodos de produção. As propriedades de isolamento térmico e de resistência à água do material permanecem incertas; no entanto, a adição de ligantes naturais pode revelar-se benéfica em termos das propriedades físicas do material (Arranz et al., 2021).

Figura 38: *Casca de arroz*
Fonte: *Autora, 2024.*

3.1.2. Etapa 02 – Estudo do material

Na etapa de estudo do material foram desenvolvidas várias misturas (fase 1, 2 e 3), com diferentes percentagens de materiais, de forma avaliar a reação das amostras, devido às mudanças de formulações. Este estudo teve início num anteprojeto (III Bienal da Ardósia de Valongo), em que a ardósia serviu de material central, sendo o “soleto” o ponto de partida para a exploração criativa.

Pretende-se oferecer uma segunda vida ao material, implementando o conceito de economia circular. Essa colaboração tem como fim elaborar uma investigação e experimentação sobre a implementação dos desperdícios gerados pela empresa. Assim, tenciona-se desenvolver um novo material associado a uma tecnologia com potencial sustentável, a Impressão 3D.

Foi elaborado um método de desenvolvimentos da avaliação das amostras (figura 41), objetivando os parâmetros de avaliação, parâmetros esses que são avaliados no desenvolvimento no ensaio da capacidade de extrusão e de construção, desenvolvidas por uma extrusora manual (pistola de calafetagem) e, futuramente (presente no capítulo 4), na impressora *Delta WASP 40100*.

Nesta etapa é importante ter em mente:

1º Preparação das misturas (figura 39): inicialmente, houve a necessidade da preparação do material e a sua seleção (esquema representativo dos materiais selecionados), que passaram por uma separação de materiais. Alguns dos materiais tiveram de ser triturados e peneirados, de forma a permitir uma maior facilidade de junção de matérias

e maior fluidez no ensaio de capacidade de extrusão. Posteriormente, os materiais foram pesados com uma balança, de forma a definir a percentagem das fórmulas. Os materiais passam por um processo pós-mistura, que envolve a combinação de diferentes matérias, para garantir uma distribuição uniforme dos componentes antes de serem compactos e sintetizados. Esta parte é crucial para assegurar a homogeneidade do material e as propriedades finais do material. Este processo é misturado à mão, sendo necessário desfazer a pasta cerâmica como os outros componentes, o que torna num processo demorado.

Figura 39: *Primeira etapa da preparação das misturas*
Fonte: *Autora, 2024.*

2º Ensaio da retração em estado "verde" (figura 40): o ensaio baseia-se num processo de secagem do estado "verde" das amostras de cerâmica. As amostras foram moldadas através de um molde quadrado de 65 mm x 65mm, em que anteriormente a pasta cerâmica foi amassada e nivelada com um rolo de cozinha, permitindo que a superfície fique uniforme. De seguida, foi decalcada a forma do molde e assinalado 50 mm nas amostras, permitindo visualizar melhor a dimensão de retração.

Como as amostras não foram submetidas ao processo de cozedura, uma quantidade significativa de água. A água está localizada nos poros de cerâmica e ocorre uma evaporação/secagem em condições ambientais. Nesta etapa é fundamental ter atenção ao ambiente em que as amostras se encontram. Se a secagem for muito rápida, pode provocar uma retração muito brusca, levando as peças a desenvolver rachaduras ou deformações (Canotilho, 2003).

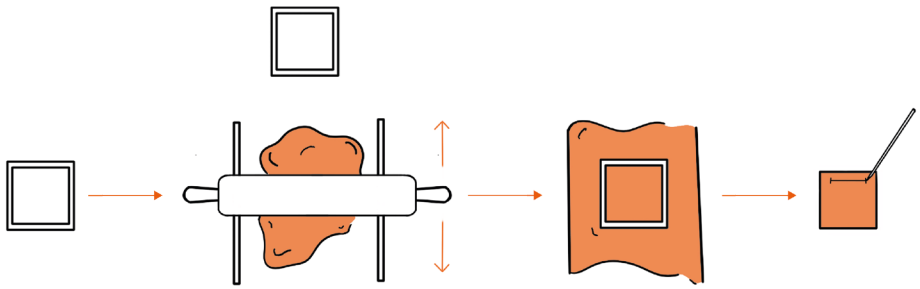
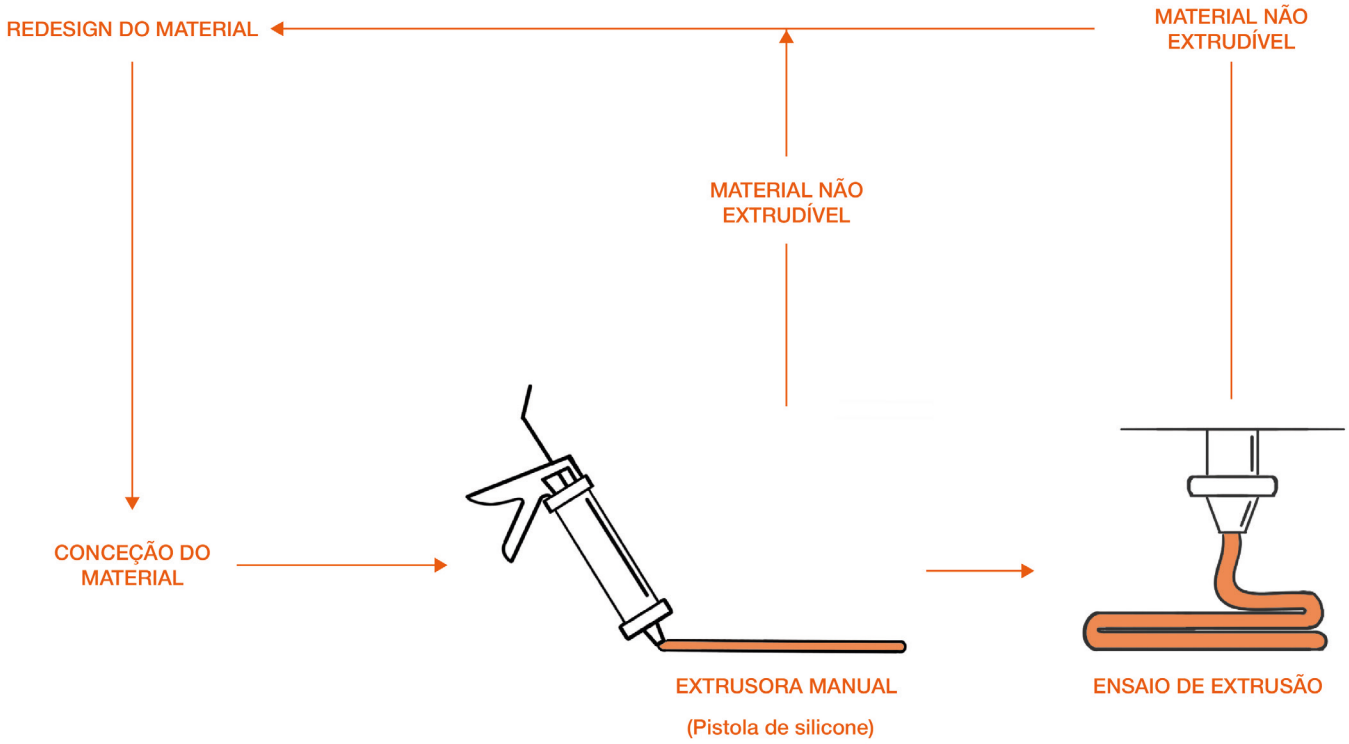


Figura 40: Segunda etapa do ensaio da retração em estado "verde"
Fonte: Autora, 2024.

3º Ensaio de capacidade de extrusão (figura 41): As composições misturadas foram realizadas através de uma pistola de calafetagem de forma a recriar uma extrusora manual, permitindo avaliar a sua homogeneidade, capacidade de extrusão e adesão entre camadas durante a impressão. Depois de demonstrar que amostra é um material viável na extrusora manual, procede-se a uma seleção que serão testadas na impressora, para avaliar sobre a sua viabilidade ou necessidade de reformular a composição. A extrusora manual (pistola de calafetagem) é uma ferramenta que possibilita replicar a extrusão do processo de impressão 3D, permitindo identificar previamente se o material desenvolvido apresenta a fluidez necessária para impressão. Os materiais que demonstraram não ser viáveis durante impressão manual foram redesenhados e passados de novo para a extrusora manual. Os resultados demonstraram ser positivos, tendo sido realizado um modelo pré-definido que permitiu visualizar o comportamento do material na impressora *Delta WASP 40100*.

Figura 41: Terceira etapa do ensaio de capacidade de extrusão
Fonte: Autora, 2024.



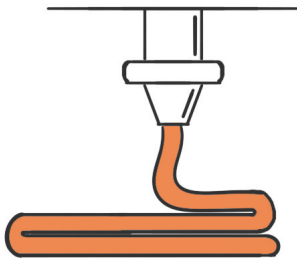
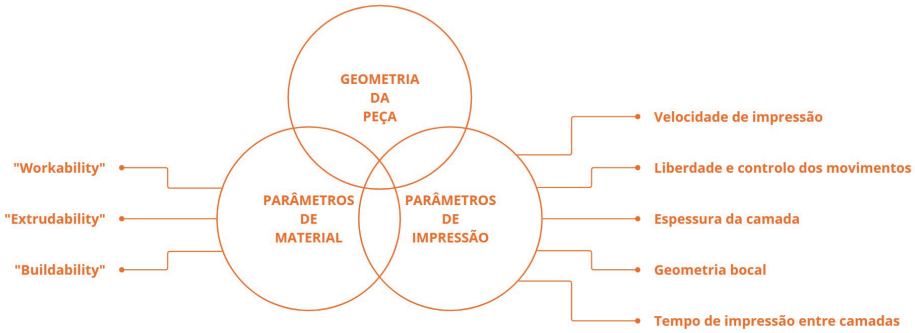


Figura 42: Quarta etapa do ensaio de capacidade de construção
Fonte: Autora, 2024.

4º Ensaio de capacidade de construção (figura 42) : neste ensaio é avaliado o comportamento do material durante o processo de adição de camadas sucessivas. É um teste para determinar se o material pode manter a estabilidade estrutural na sobreposição entre camadas, de forma a evitar o seu colapso, deformação ou falhas. A capacidade de construção é crucial para verificar e garantir que o material é adequado para o processo de impressão 3D, garantindo que produto final atenda aos requisitos de qualidade e desempenho. O teste tem como foco uma sobreposição entre camadas de três a quatro camadas de filamento, se possível até mais.

Durante este processo a qualidade do material impresso depende de uma série de fatores, representados esquematicamente na figura 43. Os fatores podem exercer influência sobre uma série de variáveis pertinentes ao processo de impressão, incluindo a velocidade, o filamento, a espessura da camada, a liberdade e o controlo do movimento. Estes, por sua vez, podem afetar o tempo necessário para a impressão de cada camada.

Figura 43: Fatores que influenciam a impressão
Fonte: (Teixeira et al., 2018). Desenhado pela autora.



Nos parâmetros do material tem como base a *"extrudability"*, *"buildability"* e *"printability"*. O método permite verificar da uniformidade da extrusão do filamento, garantindo a ausência de interrupções ou variações na largura do filamento. Adicionalmente, permite avaliar a estabilidade e uniformidade das camadas, evitando grandes deformações ou colapsos. Permite ainda monitorizar a *"extrudability"* e a *"buidability"* ao longo de toda a impressão (Teixeira et al., 2018). Estes fatores também foram determinantes nos ensaios de capacidade de extrusão, presentes no método para testar validação dos materiais desenvolvidos da figura 36. Os parâmetros de impressão permite avaliar a qualidade da peça, com a influência das configurações aplicadas na impressora 3D, tais como: o tamanho do bocal, altura da camada, velocidade, a fluidez da camada e a pressão exercida pelo compressor. Esses fatores acima mencionados na figura 43 permitiram avaliar a extrusão do material e a sua deposição entre camadas.

3.1.3. Ensaios da Etapa 02

A realização do estudo foi dividida em três fases:

Na fase inicial, identifica-se uma “amostra base” com o material cerâmico (faiança branca) e ardósia que possa servir como ponto de partida para planos experimentais futuros. Tal envolve determinar a proporção mais adequada e avaliar o impacto que o resíduo pó de ardósia tem na cerâmica, permitindo verificar que o resíduo tem potencial para ser utilizado na impressora 3D.

Na segunda fase, ao selecionar amostra com melhores resultados (referidos no subcapítulo seguinte), foram adicionados outros pós de resíduos industriais: o tijolo, mármore e granito.

A fase final teve uma abordagem diferente na incorporação dos materiais. Houve uma seleção de matérias-primas convencionais, como borra de café, serrim, casca de ovo e casca de arroz.

Foi realizada uma análise visual e táctil nas amostras (observando a cor, textura e possíveis defeitos visíveis) e os critérios de avaliação, presentes na capacidade de extrusão e de construção, com mistura homogénea, uniformidade do filamento extrudido e adesão entre camadas.

3.1.3.1. Composição base (Faiança + ardósia + monocol v)

Todas as misturas desenvolvidas apresentam uma dada percentagem de pó de ardósia, água e cerâmica. Com efeito, para perceber a influência do desperdício em cada material para impressão 3D, a mistura decorreu nos seguintes moldes: a relação água/pó (w/p) foi obtida através da realização de vários ensaios de mistura, partindo de um acréscimo gradual de água, aumentando-se, assim, a dosagem até se obter uma consistência que permita a impressão.

Na primeira fase de amostras tentou reduzir-se à quantidade possível e acrescentar resíduo de ardósia, sem haver a necessidade de acrescentar muita água. A faiança já se encontra no estado sólido, pelo que é necessário partir a pasta cerâmica em pequenos pedaços para facilitar o processo de mistura. Em seguida, é necessário adicionar a quantidade de água necessária. A quantidade de faiança e de pó de ardósia presente é de 300 gramas total de material sólido, e a tabela 3 é apresentada em percentagem, facilitando assim a perceção da alteração gradual da composição. A água é separada da percentagem e apresentada em mililitros; o monocol v, como aglutinante, é apresentado em percentagem, mas como soma.

O objetivo era identificar uma amostra de referência que servisse de base para a conceção experimental. Para explorar o comportamento da mistura, foram preparadas amostras com as seguintes proporções:

Tabela 4: *Composição de amostra base*

Amostras	Faiança (%)	Pó de ardósia (%)	Água (ml)	Monocol V (%)
A1	100	-	-	-
A3	90	10	7	-
A4	80	20	8	-
A5	30	70	12	-
A6	70	30	9	-
A7	70	30	9	1
A8	30	70	9	1

Nota: Os dados são apresentados sob a forma de percentagem

No decorrer deste processo é percetível a diferença de percentagem aplicada de resíduo nas composições, o que permite uma diferença gradual e percetível na aplicação. A composição com maior dosagem de pó de ardósia atingiu os 70% da massa total da composição. No entanto, para melhorar as suas propriedades para impressão, foi necessário diminuir a quantidade utilizada nas restantes composições.

Nas amostras A5 e A6 foi feito um estudo inicial entre o comportamento do pó de ardósia, cerâmica e água e assim analisar a percentagem média de água necessária.

Nas composições A7 e A8 foi implementado o monocol V, uma resina acrílica, com o intuito de melhorar a capacidade de extrusão através da fluidez. No entanto, devido ao seu carácter altamente poluente, foi decidido que será eliminado do próximo plano experimental. Será procurado um material residual alternativo para o substituir, com o objetivo de melhorar a fluidez.

Ao analisar a capacidade de extrusão, verifica-se que, apesar da necessidade de adição de água à medida que o resíduo aumenta, a quantidade incorporada de água é mínima. A ardósia, sendo um material que apresenta uma certa porosidade (Gomes, 2015), não interfere na extrusão. Evidencia uma boa fluidez na pistola de calafetagem, sem apresentar qualquer fissuras ou textura adicional.

Figura 44: *Amostras realizadas no Anteprojeto*
Fonte: *Autora*

É percetível o ganho de visual plástico nas amostras, pela incorporação do resíduo. A amostra A5, que tem uma percentagem mais elevada de resíduo, apresenta um maior grau de brilho do que as amostras com uma percentagem mais baixa. Após o processo de cura (figura 44), o material requer um período de mais de 24 horas à temperatura ambiente, durante o qual, o brilho das amostras diminui, devido à evaporação da humidade. Também é percetível a fragilidade do filamento em estado "verde" (antes da queima), possivelmente relacionado à porosidade e a outras propriedades físicas do pó de ardósia. No estado verde, as cerâmicas são mais suscetíveis a falhas mecânicas, ou seja, apresentam uma maior fragilidade e ligações mecânicas mais fracas entre as partículas (Dele-Afolabi et al., 2018; Yamamoto et al., 2018).

A porosidade aplicada na cerâmica, devido ao resíduo, pode condicionar o aumento de fissura, quebras ou deformações durante o processo da secagem e manuseio, como foi o caso. Sendo assim, podemos concluir que apresenta resultados promissores nos ensaios de extrusão e capacidade de construção, mas deixando em causa a resistência do material.

A amostra A5, demonstra ser mais viável para os seguintes planos experimentais. Evidencia ter melhores resultados na fluidez durante a

extrusão manual, sem apresentar texturas desvantajosas e boa aderência entre camadas. Os experimentos seguintes vão ser explorados ao redor desta composição, com adição de outros tipos de resíduos, ajustando diferentes proporções de resíduos.

3.1.3.2. Composições de desperdício industrial (Faiança + ardósia + Pó de mármore + pó de granito) + pó de tijolo

O objetivo desta fase é aplicar os desperdícios industriais, de forma a que se otimize mas propriedades físicas, mecânicas à amostra base (A5) selecionada, principalmente no que toca à resistência mecânica e, eventualmente, a um material leve e apelativo na estética. Isto é vantajoso, na medida em que reforça a ideia da reutilização de resíduos industriais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e redução de custos de produção.

Para dar continuidade ao processo experimental, foram selecionados três tipos de resíduos: (i) o pó de tijolo, que foi realizado no anteprojeto; (ii) dois materiais que pertencem à classe de rochas ornamentais, que têm uma taxa mais elevada de resíduos industriais, nomeadamente a ardósia (Rochas Ornamentais e Industriais Portuguesas, 2022). As proporções foram ajustadas para incluir os resíduos industriais, mas mantendo a mesma quantidade (300g) no resíduo de ardósia e cerâmica e foi aplicada a soma das percentagens, resultando nas seguintes combinações:

Tabela 5: *Composição base com resíduo de tijolo*

Amostras	Faiança (g)	Pó de ardósia (g)	Água (ml)	Monocol V (%)	Pó de Tijolo (g)
A9	210	90	50	-	30
A9.1	210	90	50	1	30
A10	210	90	50	-	45
A11	210	90	60	-	75

Nota: Os dados passaram a ser apresentados sob a forma de gramas

Como referido no subcapítulo 4.1.1.4., estas quatro amostras (tabela 4) foram ainda realizadas no anteprojeto e, dessa forma, os outros resíduos encontram-se na tabela 5 e 6.

O pó de tijolo foi aplicado gradualmente 10%, 15% e 25%, na amostra base (70% cerâmica e 30% de ardósia).

As amostras A9, A9.1 e A10 aparentam ter a mesma textura suave e consistência de extrusão que amostra base, mas devido à pouca quantidade de água e o aumento de resíduo, o material torna-se mais seco e pouco homogéneo.

Na amostra A11 (figura 45), como houve um aumento de resíduo, houve uma necessidade de sair da quantidade de percentagem base de água, com um acrescente de mais 10 ml. Essa alteração permitiu readquirir uns bons resultados de impressão manual. Para além disso, resultou numa aparência estética mais apelativa.

Em relação ao tema da pós-cura, o material aparentou ter a mesma capacidade de absorção e retenção de água, o que pode ser uma vantagem no ensaio de extrusão da impressora *Delta WASP 40100*. Já no ensaio de capacidade de construção, as três primeiras amostras foram mais dificil de imprimir, requerendo mais força. Em questão de critério, a amostra que demonstra maior viabilidade de impressão é a A11, que viabilizou uma boa aderência entre camadas, consistência de extrusão, impressão suave e um bom fluxo.

Figura 45: *Amostra A11*
Fonte: *Autora*

Na fase pós-anteprojeto, foram incorporados os resíduos de granito (pó e granulometria 0.85 mm) e pó de tijolo (granulometria entre 0,02 a 0,05 mm). Como a incorporação de resíduos teve resultados favoráveis, e como no subcapítulo 2.1.3 são apresentados estudos sobre a aplicação de pó de tijolo com pó de ardósia em cerâmica, aplicou-se a mesma abordagem (pó de tijolo) às composições com resíduos de granito. No resíduo de granito são aplicados gradualmente 10%, 15%, 25% e 30%.

Foram aplicadas percentagem mais elevadas e aplicações de resíduos com uma certa granulometria (0,85 mm), de forma a recriar uma textura, dando um aspeto diferenciado.

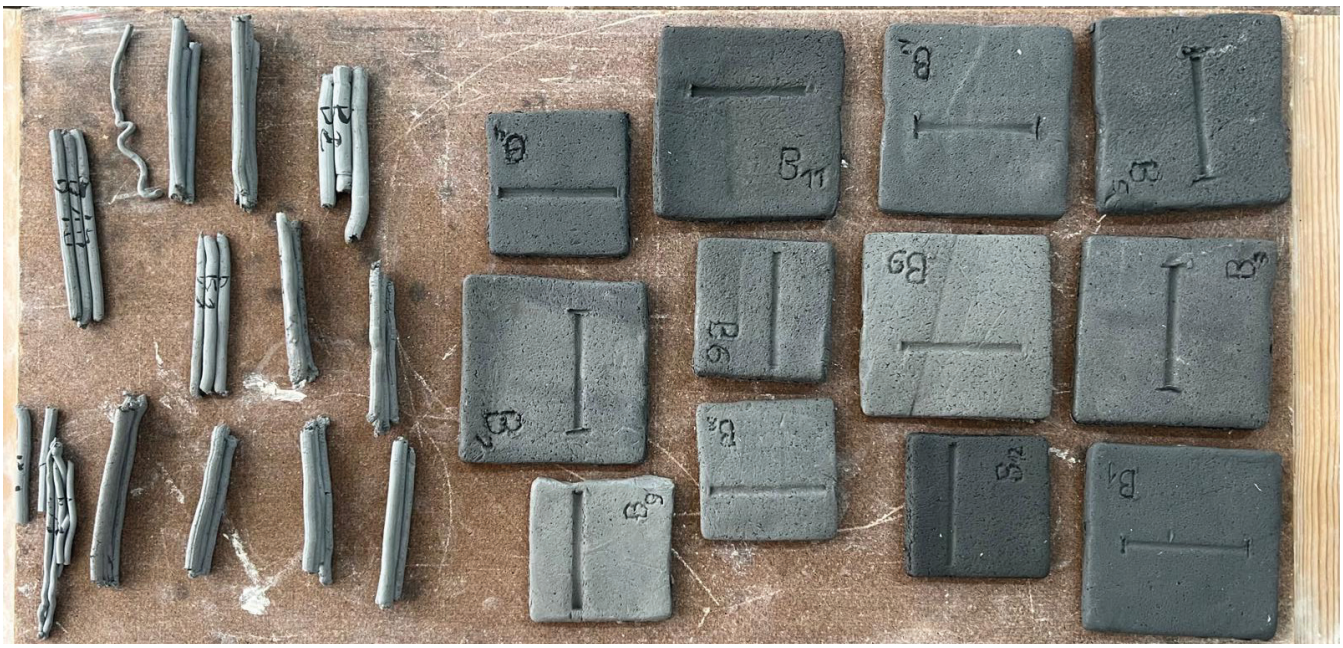
Tabela 6: *Composição base com resíduo de granito e tijolo*

Amostras	Faiança (g)	Pó de ardósia (g)	Água (ml)	Monocol V (%)	Pó de Tijolo (g)	Pó de Granito (g)	Granito 0.85 mm (g)
B1	210	90	40	-	-	30	-
B1.1	210	90	40	-	-	-	30
B2	210	90	40	1	-	45	-
B2.1	210	90	40	-	-	-	45
B3	210	90	40	-	-	75	-
B3.1	210	90	40	-	-	-	75
B4	210	90	40	1	-	75	-
B5	210	90	50	-	-	90	-
B5.1	210	90	50	-	-	-	90
B6	210	90	50	1	-	90	-
B13	210	90	45	-	15	30	-
B14	210	90	45	-	30	30	-

Nota: Os dados passaram a ser apresentados sob a forma de gramas

Apesar do aumento da percentagem de resíduos, não houve necessidade de um aumento de água. Um aumento de 10 ml foi suficiente para permitir uma boa fluidez nas amostras B5 e B6, sendo que tiveram um aumento com 30% de resíduos de granito. A preparação das amostras com granulometria de resíduo, revela um subtil aumento na textura do material cerâmica, o que pode ser entendido como uma vantagem visual. No entanto, este facto pode potencialmente levar a limitações e complicações no ensaio de extrusão. Foi demonstrado que o resíduo (em pó ou granulado) eleva a dureza do material (figura 46), tornando a homogeneidade das amostras mais dificil de alcançar.

Figura 46: *Amostras B*
Fonte: *Autora, 2024*



No ensaio da capacidade de extrusão (figura 47), as amostras contendo pó de granito demonstraram fluidez, com algumas exibindo níveis de viscosidade mais altos (B1 a B3) do que outras. Este aspeto possibilita uma redução do teor de água, o que pode ser benéfico. O Monocol V foi incorporado nas amostras B2, B4 e B6 em resposta à necessidade de diminuir a elevada dureza e de aplicar um aglutinante que facilitasse a extrusão sem criar qualquer rutura e melhorasse a homogeneidade. O material mostra um constrangimento, que servia para reduzir a sua rigidez inerente.

Figura 47: *Pormenor do filamento das amostras B*
Fonte: *Autora*

No que diz respeito às amostras com uma composição de granulometria (B1.1, B2.1, B3.1 e B5.1), apesar de apresentarem uma boa aderência entre camadas, requerem a adição de um ligante devido à sua textura. Adicionalmente, a textura das amostras resultou na formação de fissuras no filamento, o que dificultou a impressão com a extrusora manual. Além disso, a dureza do material persistiu. Foi demonstrado que a substância (pó de granito) adere efetivamente entre camadas, potencialmente devido à sua viscosidade. No entanto, pode apresentar uma precisão reduzida e um menor grau de conformidade com as especificações que podem vir a ser necessárias para o produto final.

Já abordando as amostras com pó de mármore, foi executada uma adição de 10%, 20% e 30% de resíduos. Nas amostras C5 a C6, foram introduzidos resíduos de tijolo, pelas razões anteriormente expostas. Na amostra C4, houve uma modificação da composição de base, com uma substituição de percentagens (30% cerâmica e 70% pó de ardósia).

Tabela 7: *Composição base com resíduo de mármore e tijolo*

Amostras	Faiança (g)	Pó de ardósia (g)	Água (ml)	Pó de Tijolo (g)	Pó de Mármore (g)
C1	210	90	30	-	30
C2	210	90	30	-	60
C3	210	90	45	-	90
C4	90	210	30	-	30
C5	210	90	40	30	30
C6	210	90	40	60	30
C7	210	90	40	90	30

Nota: Os dados passaram a ser apresentados sob a forma de gramas

A composição C4 aparentou uma viscosidade mais elevada apesar da ausência de um componente adicional de água, o que nem sempre é benéfico durante a extrusão. A alteração das percentagens na composição base diminui inerentemente a quantidade de cerâmica utilizado como aglutinante entre os resíduos, como é no caso do pó de mármore. A adição de pó de mármore às amostras (C1 a C7) não só resultou numa consistência visualmente suave, como também facilitou a preparação da mistura e garantindo uma composição homogénea. Na capacidade de extrusão, demonstrou resultados eficazes, pela sua composição lisa. Um processo de impressão fluido e sem interrupção de extrusão.

Já a referida adição de pó de tijolo à composição de base com a soma de pó de mármore, resultou num aumento de apenas 10ml de água nas amostras C5, C6 e C7. Ao nível da extrusão, o material aparenta ser mais denso, mas continua a ter uma perceção visual plástica. A nível de capacidade de construção, a incorporação de pó de mármore na composição base ostenta uma ótima aderência entre camadas. Visualmente, é notória a redução de porosidade das amostras, o que pode ser benéfico na sobreposição de camadas, tornando o material mais leve.

A retração das amostras não é influenciada pelos resíduos, o que leva a supor que a retração em estado “verde” é provocada por componentes cerâmicos. Isto pode ser considerado benefício, até ser avaliada a retração de cozedura. A implementação de resíduos industriais como o pó de tijolo e pó de mármore, comprovaram ser benéficas durantes os ensaios – preparação de mistura, retração, capacidade de extrusão e de construção – com uma boa aderência entre camadas, boa fluidez, um filamento contínuo e na composição de pó de mármore, um material mais leve.

3.1.3.3. Composições convencionais (Faiança + ardósia + borra de café + serrim + casca de ovo + casca de arroz)

O objetivo desta fase é aplicar materiais convencionais (borra de café, serrim, casca de ovo e casca de arroz) na amostra base (70% cerâmica + 30% pó de ardósia) para avaliar melhorias nas propriedades finais.

Na tabela 7 está presente as composições (amostras A12 a A14) ainda aplicadas no anteprojeto, com a incorporação de borra de café. O objetivo da incorporação deste resíduo é aproveitar a sua maior porosidade para melhorar o isolamento térmico e a absorção de água. Este resíduo foi também introduzido nas amostras de pó de granito com a finalidade de tentar criar uma dinâmica na cor das amostras e reduzir a densidade, o que poderia resultar num material mais leve. Em contrapartida, as amostras anteriores que continham granito resultaram em amostras mais densas.

Tabela 8: *Composição base com resíduo borra de café com resíduo industrial*

Amostras	Faiança (g)	Pó de ardósia (g)	Água (ml)	Monocol V (ml)	Borra de café (g)	Pó de granito (g)
A12	210	90	40	-	30	-
A12.1	210	90	40	2	30	-
A13	210	90	40	-	45	-
A14	210	90	40	-	75	-
B7	210	90	40	-	15	10
B8	210	90	40	2	15	10
B9	210	90	50	-	30	10
B10	210	90	50	2	30	10
B11	210	90	40	-	45	10
B12	210	90	40	2	45	10

Como se pode observar, a incorporação do monocol v foi considerada essencial para aumentar a maleabilidade e a flexibilidade do material, evitando simultaneamente a ocorrência de rutura ou a manifestação de texturas indesejáveis observadas nos ensaios de extrusão com interrupção do filamento. No resíduo de borra de café foi executada uma adição de 10%,15%, 25%, que demonstrou não haver grande alteração entre elas.

A incorporação de resíduos convencionais, tal como apresentados na tabela 8, pretende identificar um ligante que possa substituir a resina (monocol v), que não tem obtido resultados promissores e é um material que suscita questões em relações à sustentabilidade devido às suas propriedades.

Tabela 9: *Composição base com resíduos convencionais*

Amostras	Faiança (g)	Pó de ardósia (g)	Água (ml)	Serrim (g)	Serragem (g)	Casca de ovo (g)	Casca de arroz (g)	Pó de tijolo (g)
D1	210	90	40	-	15	-	-	-
D2.1	210	90	40	15	-	-	-	-
D2	210	90	40	-	30	-	-	-
D2.1	210	90	50	30	-	-	-	-
E1	210	90	40	-	-	30	-	-
E2	210	90	45	-	-	60	-	-
E3	210	90	50	-	-	90	-	-
E4	210	90	40	-	-	30	-	30
F1	210	90	40	-	-	-	30	-
F2	210	90	40	-	-	-	60	-
F3	210	90	40	-	-	-	90	-

Nas amostras D1 e D2 apresenta a incorporação de serragem em vez de serrim, com o objetivo de criar texturas. Consequentemente, o ensaio de extrusão manual revelou-se inviável e a ideia de incorporar resíduos de qualquer composição granulométrica foi descartada. A amostra de serradura ilustra a necessidade da presença de um aglutinante para permitir uma extrusão uniforme. As amostras E demonstram uma maleabilidade melhorada, acompanhada de uma funcionalidade de aglutinante, com impressão adequada e uma uniformidade de extrusão. A amostra apresenta um aspeto dinâmico, atribuível ao contraste de cor entre a amostra base e o resíduo de casca de ovo. Relativamente à incorporação da casca de arroz na amostra base, foi feita uma adição de 10%,20% e 30%. Os resíduos foram triturados e peneirados (aproximadamente 600 μm), facilitando a mistura das amostras e tornar o filamento uniforme. O teste de extrusão manual, resultou num material pouco homogéneo.

Para concluir esta fase, foi necessário identificar as amostras que obtiveram os resultados mais viáveis no ensaio de preparação do material e de capacidade de extrusão, tais como amostra:

- A11 = composição base (30% de pó de ardósia, 70% de faiança branca) e uma adição de 25% de Pó de tijolo;
- B14 = composição base + 10% de pó de tijolo + 10% pó de granito;
- C3 = composição base + 30% de pó de mármore;
- E4 = composição base + 10% casca de ovo + 10% pó de tijolo

3.1.4. Etapa 03 – Processo de comportamento térmico

O processo de comportamento térmico determina a viabilidade das

amostras na aplicação de produtos, que implica ser um material exposto a variadas temperaturas. É possível prever as possíveis reações de cozedura da pasta cerâmica (figura 48), mas devido aos resíduos implementados existe uma necessidade de uma análise térmica nas amostras relativa à cozedura. As informações essenciais sobre a estabilidade dimensional, a resistência ao choque térmico e o coeficiente de expansão térmica são parâmetros que influenciam diretamente a durabilidade e a funcionalidade dos materiais cerâmicos.

Nesta fase o propósito é avaliar o desempenho térmico das amostras com diferentes composições de faiança, resíduos industriais (ardósia, tijolo, mármore e granito) e materiais convencionais (borra de café, serrim, casca de ovo e casca de arroz) submetidos a variações térmicas. Esta análise permitirá identificar as amostras com melhor desempenho térmico e as variações das tonalidades dos materiais sob condições extremas de calor.

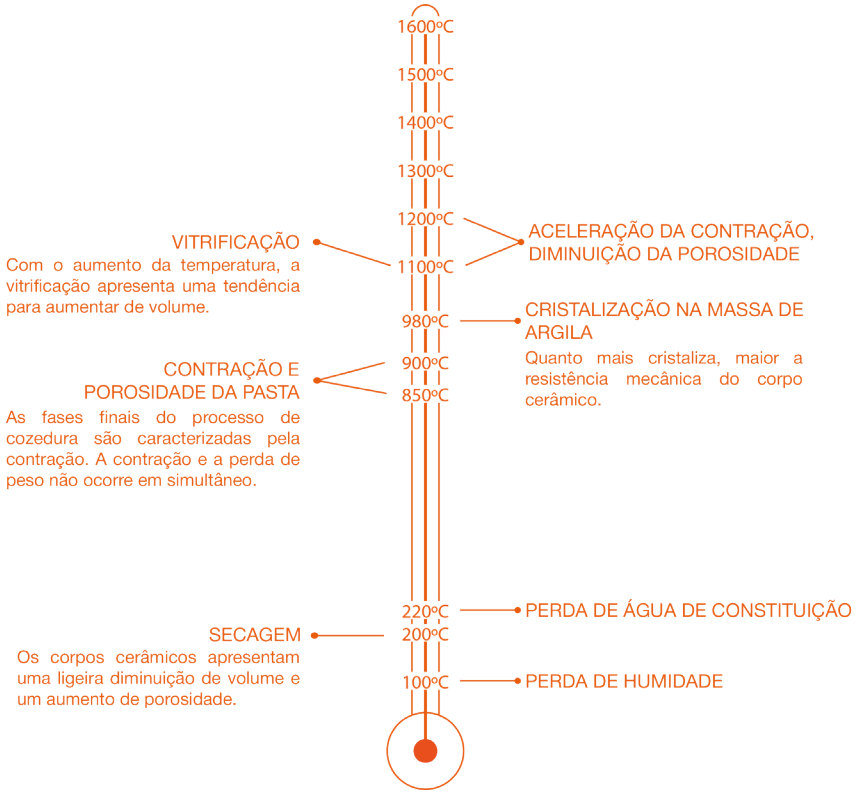


Figura 48: *Reações da cozedura da pasta cerâmica*
Fonte: M. H. Canotilho, 2003. Desenhado pela autora

O objetivo é analisar se as amostras mantêm suas dimensões originais após o ciclo de aquecimento/cozeduras em diferentes temperaturas e arrefecimento, determinando possíveis deformações ou demasiada retração. A técnica utilizada para medir a retração foi marcar as amostras com 50 mm de largura de forma avaliar a contração das amostras sob aquecimento. As amostras preparadas mencionadas no subcapítulo 3.1.3 são submetidas a 3 diferentes testes de temperatura de sinterização: 1180ºC nas amostras do anteprojeto; e uma comparação de temperaturas

950ºC e 1050ºC. Este processo necessita de controlo do tempo e das várias temperaturas, em relação à composição da matéria. A cerâmica de faiança branca é um material de temperaturas baixas (1050-1080ºC). No entanto, nas amostras do anteprojeto (Amostras A), para alcançar uma comparação mais acentuada, foi aplicada uma temperatura mais elevada (figura 49). O processo iniciou com uma taxa de 70ºC/h atingindo uma temperatura de 600ºC/h, de modo a retirar o excesso de humidade da peça (com aberturas no forno). Quando o forno atingiu a temperatura de 600ºC, a água absorvida foi eliminada através dos poros da superfície da argila. Por fim, a temperatura foi elevada de 170ºC/h até 1180ºC, mantendo constante esta temperatura durante um período de 5 minutos. Posteriormente, o processo de arrefecimento ocorreu em condições naturais, dentro do forno.

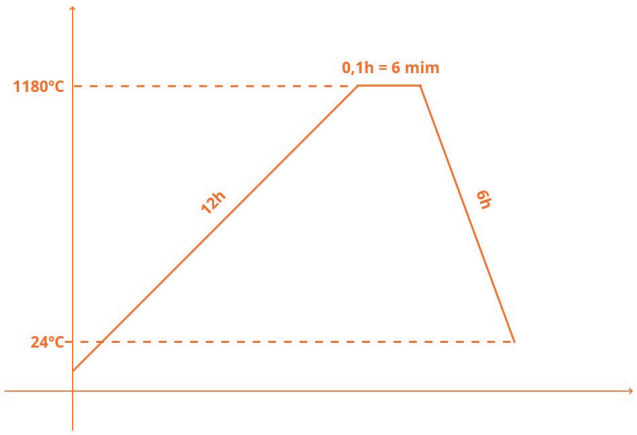


Figura 49: *Temperatura de 1180ºC*
Fonte: Autora

Resumidamente o processo passou por:

- A fase inicial de aquecimento foi efetuada a uma taxa de 70°C/h até 600°C;
- Aumento de temperatura a 600°C/h até atingir 1180°C;
- Temperatura contante de 1180°C durante 5 min;
- Arrefecimento natural exponencial após o processo de cozedura.

Neste estudo preliminar (anteprojeto), a retração das amostras não foi avaliada, uma vez que o objetivo era meramente avaliar as propriedades estéticas (figura 50). A pedra de ardósia foi submetida a temperaturas elevadas para verificar a sua reação e comportamento nessas condições. Existiu uma desidratação e perda de água causada pela temperatura, tornando visível uma mudança de cor drástica com tom avermelhado brilhante e uma expansão térmica. Essa expansão térmica criou aberturas nas várias camadas finas (foliações) dispostas de maneira paralela e deformação na superfície, criando uma textura irregular, que pode causar fissuras.

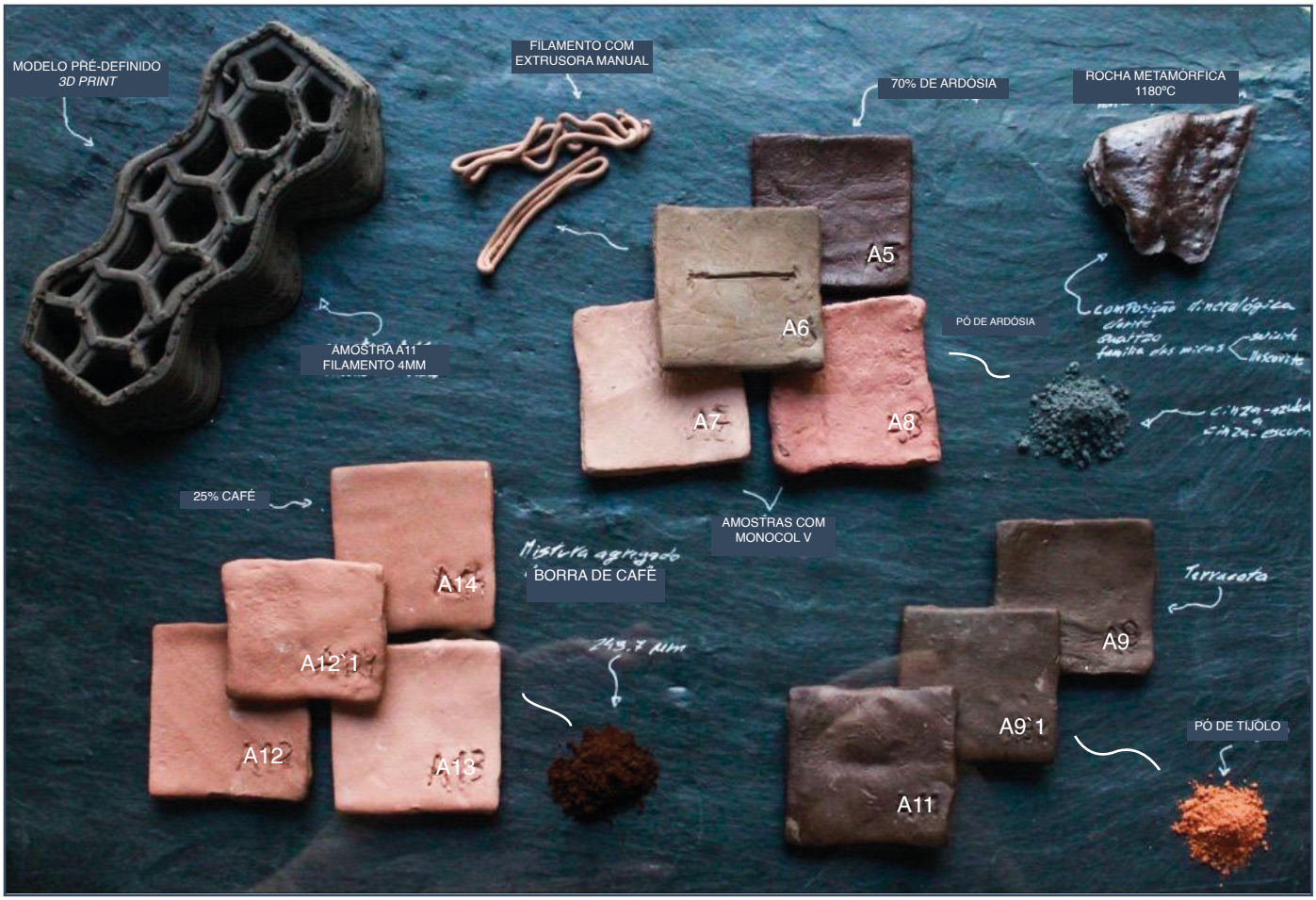


Figura 50: *Moodboard do plano experimental do Anteprojeto*
Fonte: Autora, 2024

Durante o processo de cozedura, as amostras (pó de ardósia, faiança, monocol V e água) sofreram uma grande variação de cor, do estado verde para o estado final da “chacota”. As amostras com monocol V (A7 e A8) apresentam tonalidades mais claras que as amostras A6 e A5. A introdução de monocol V (resina acrílica) permitiu facilitar a manipulação da matéria e originar uma mudança de cor mais drástica. Já relativamente às amostras com a implementação de pó de tijolo com uma percentagem que deriva de 10%,15% e 25%, não demonstra uma grande diferença entre elas (A9, A9.1, A10 e A11), mantendo uma cor marrom escuro-chocolate. As variações da borra de café de percentagem também derivaram de 10%, 15% e 25%, mas apresentam uma cor rosa-claro, sendo o mais aproximado da ardósia em estado “chacota”.

As amostras posteriores (B a F) já foram submetidas a duas temperaturas diferentes (950ºC a 1050ºC), o que permitiria serem mais viáveis no aumento da sua resistência mecânica e uniformização da retração do material. Esta decisão foi tomada com base nos resultados apresentados no capítulo 2.1.3, que avaliam a resistência mecânica, a perda de peso,

a densidade, a resistência à flexão e a permeabilidade do pó de ardósia implementado em cerâmica. Os resultados desses estudos demonstram que os resíduos de ardósia apresentaram bom desempenho como matéria-prima, de acordo com os parâmetros de avaliação considerados, além de oferecerem uma variedade de cores após a cozedura como apresenta a figura 50.

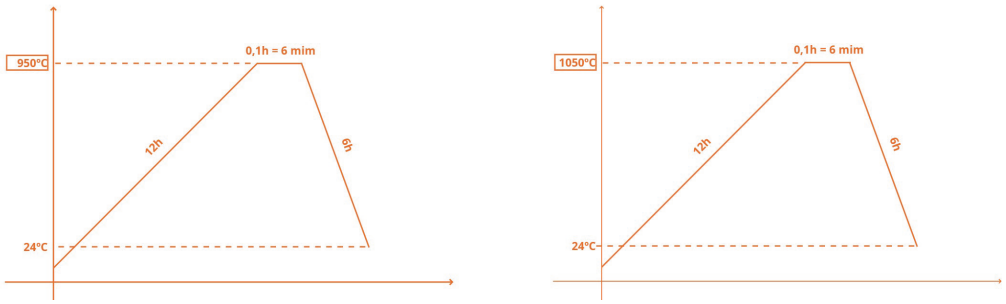


Figura 51: *Temperaturas de 950ºC e 1050ºC*
Fonte: Autora

A redução da temperatura resultou numa considerável diferenciação de cores previstas, devido aos resultados anteriores. As tonalidades observadas (figura 50) apresentam um tom rosado claro, com tendência para o branco, e não aparenta quase distinção visível entre as temperaturas de exposição de 950ºC e 1050ºC. É possível que as propriedades do material possam ter sofrido alterações.

O material que contém uma composição de pó de mármore tornou-se mais leve em comparação com a amostra A11 e aparenta ter uma superfície lisa. Demonstra uma diferença gradual de cor devido ao aumento da percentagem do resíduo, progredindo de uma tonalidade clara para uma mais escura. O resultado foi inesperado: os resultados não foram positivos, pois a composição com resíduos de casca de ovo, apesar de ter apresentado uma textura caraterística e distinta, após uma exposição de 24 horas ao ar livre, começou a desfazer-se, apresentando um grau de fragilidade considerável.

Figura 52: *Amostra com reação de desintegração*
Fonte: Autora

As amostras A11, B, C3 e E4, produzidas com a extrusora manual, que apresentaram resultados favoráveis no ensaio anterior, foram também sujeitas a cozedura para verificação da resiliência do filamento após este processo. Apesar do resultado positivo do ensaio de retração, foram submetidas cozedura nos filamentos. As composições com piores resultados foram as amostras B (resíduo de granito) e E (resíduo de casca de ovo), demonstrando fragilidade mesmo após a cozedura. Após um período de cozedura de 24 horas e subsequente exposição ao ar livre, todas as amostras que continham resíduo de casca de ovo sofreram uma reação de desintegração (figura 52). Por outro lado, as amostras A11 e C3, demostraram ser uma composição viável para a próxima fase de estudo.

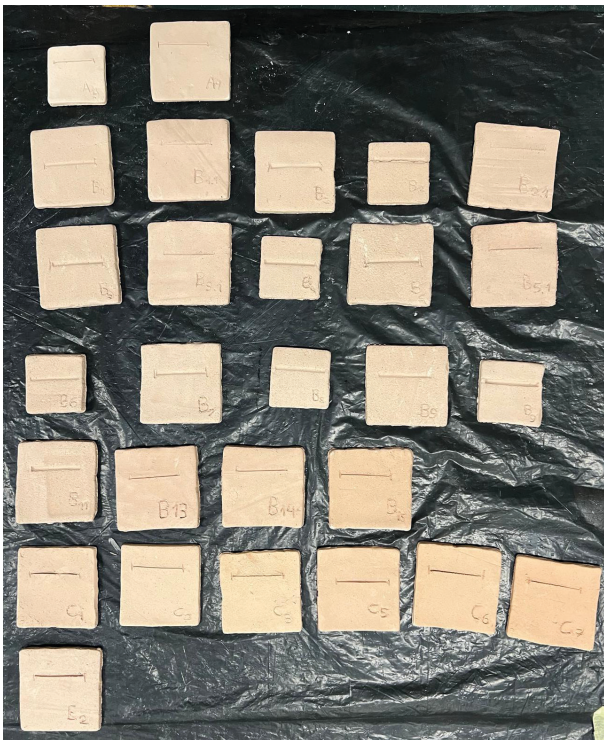


Figura 53: *Amostras expostas a temperaturas de 950ºC e 1050ºC*
Fonte: Autora

A retração das amostras (B a F) apresenta uma redução percentual constante, o que permite supor que o seu comportamento não é influenciado pelos resíduos, mas sim pelas fases da ação do calor sobre um corpo cerâmico e os seus (Canotilho, 2003) da pasta de faiança. Dadas a limitações de tempo e a indisponibilidade dos materiais necessários, recomenda-se a realização de testes mais precisos numa data posterior. Esse cálculo da retração permite prever o tamanho final da peça. A retração é causada pela eliminação de humidade durante os processos de secagem e cozedura, o que resulta na compactação dos materiais cerâmicos. Dessa forma, é preciso calcular a retração linear, da seguinte forma:

$$Retração\ Linear\ (\%) = \left(\frac{Lcrua - Lcozida}{Lcrua}\right) \times 100$$

Lcrua = Comprimento inicial (antes da secagem)

Lcozida = Comprimento final (após o processo)

Serão mencionados a retração linear da amostra (C3) com melhores resultados no estudo de extrusão, submetidas a duas temperaturas diferentes (950ºC a 1050ºC). Os resultados obtidos do cálculo da retração linear das amostras cerâmicas são apresentados na tabela 9. As medidas foram realizadas antes da secagem e após o processo de secagem, conforme descrito na seção anterior. Além disso, os resultados dos cálculos de retração linear são comparados com as características técnicas presentes na faiança branca, já mencionados no capítulo 3.1.1.1.

(Cerâmica – Faiança), que descrevem o material cerâmico com uma retração de secagem de 6.8% e uma contração de cozedura -0.4%, a temperatura de 1050ºC (Artes, 2024).

Figura 54: *Amostras C*
Fonte: Autora

Tabela 10: *Retração linear das amostras cerâmicas*

Amostra	Temperatura (ºC)	Comprimento inicial (mm)	Comprimento final (mm)	Retração linear	Retração Linear da faiança
C3	950	50	46.8	6.4	6,7
C3	1050	50	46.8	6.4	6,7

Como era esperado todas as amostras (figura 54) apresentam uma redução de comprimento. Observa-se que as amostras apresentam valores de retração iguais (6,4%), apesar das diferentes temperaturas. O que se destaca é a variação da retração linear das amostras C3 para o material cerâmico base (faiança branca). Esta variação pode ser atribuída devido a possíveis distribuições de porosidade, com a incorporação de pó de ardósia e de mármore.

3.1.5. Etapa 04 – Calibração

Esta etapa serviu para avaliar o funcionamento do material na impressora 3D. Este teste foi uma incorporação do material selecionado (A11) no anteprojeto. A composição A11 apresenta 30% de desperdício de ardósia e a soma de 25% de pó de tijolo, no material cerâmico. Este teste foi feito através de um modelo pré-definido pelo investigador João Teixeira no contributo digi@feup, integrado no núcleo de Física das Construções do LFC/FEUP (Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), que permite inicialmente avaliar determinados aspetos, concretamente: se é possível imprimir; apresenta filamento e camadas uniformes; sobreposição entre camadas; estabilidade dimensional.

O modelo (figura 55) apresenta uma base de estrutura, onde foi possível definir a quantidade de fluidez, pressão de ar e a velocidade necessária na impressão. Inicialmente, a extrusão foi efetuada com um bocal de 6mm, mas devido à falta do controlo em relação à velocidade de impressão e à quantidade da saída do fluxo de material, foi necessário otimizar o controlo do filamento.

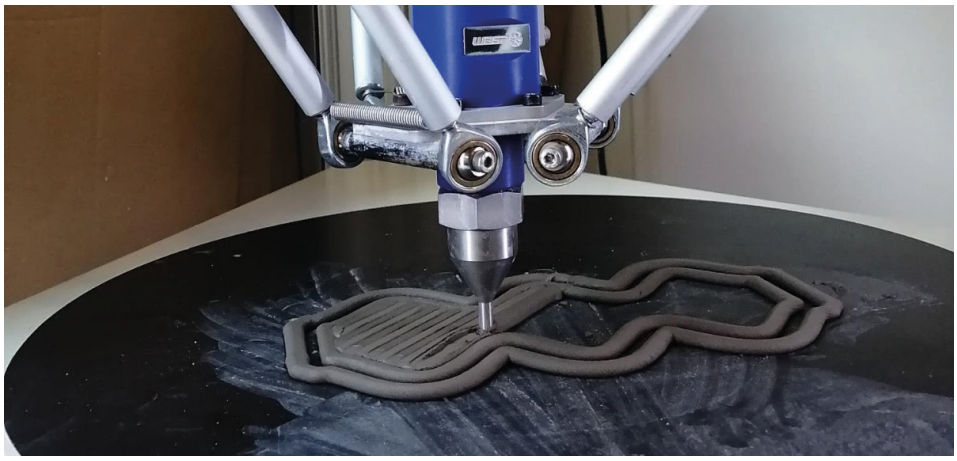


Figura 55: *Teste de calibração com bocal de 6mm*
Fonte: Autora, 2024

Devido ao excesso de fluxo do material, as camadas eram empurradas entre si, criando instabilidade dimensional. Para tal, no decorrer da impressão, o bocal foi substituído por um de 4mm. Essa mudança permitiu um maior controlo do filamento e a diminuição da quantidade de fluxo do material. O ensaio de calibração foi analisado durante o processo de extrusão, sobre o mesmo produto (figura 55). A meio da impressão em que foi substituído o bocal, verificou-se que o material apresenta bons resultados de fluidez, na sobreposição de camadas e estabilidade dimensional.

A figura 56 e 57 demonstra bons resultados de impressão, revelando a presença de quantidades mínimas de material distribuído na parte superior do modelo, dando a perceção de uma camada com filamento interrompido. Este acontecimento pode ter acorrido devido à ausência de material. O teste de calibração permite observar que o material é viável para criações futuras de modelos 3D. Também é de notar a influência da mudança de cor, à medida que o material permanece no estado “verde”.

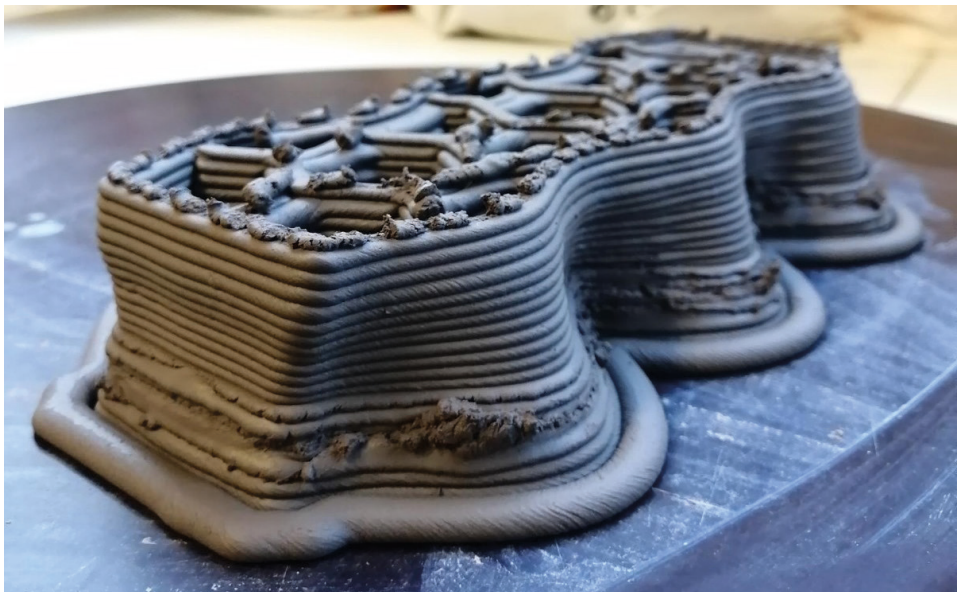


Figura 56: *Modelo pré-definido em estado “verde”*
Fonte: Autora

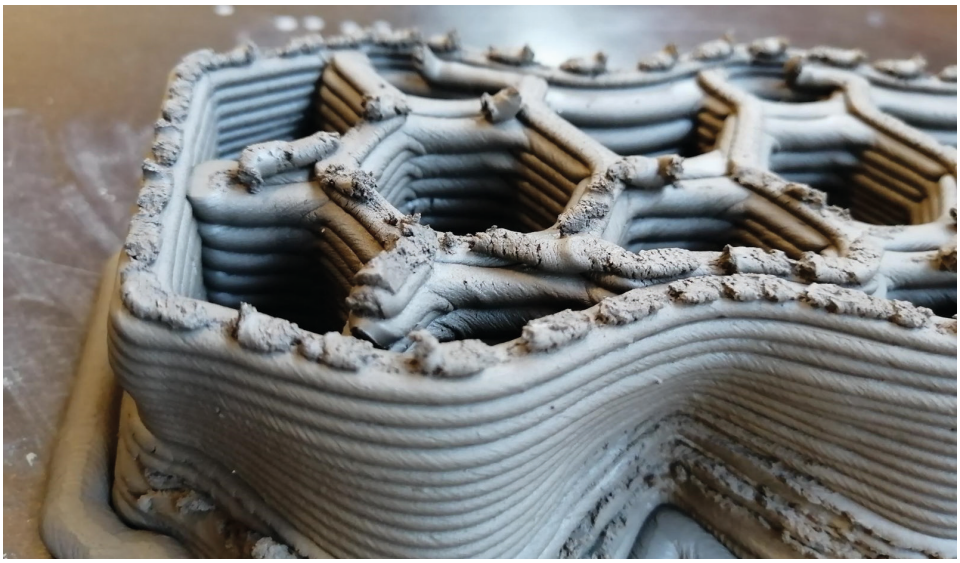


Figura 57: *Pormenor do modelo pré-definido em estado "verde"*
Fonte: Autora

Com efeito, o estudo teve o objetivo de explorar a predominância do desperdício gerado (pó de ardósia) e, assim, desenvolver um novo material implementado na Impressão 3D. De facto, o processo de classificação, baseado nos métodos de validação dos materiais e a análise do resultado dos processos de cozedura ocuparam um papel determinante na redução de desperdícios do setor industrial. O estudo experimental assenta na implementação de desperdícios (o pó de ardósia, a cerâmica e outros resíduos) para a criação de novos materiais. Estes resultados permitiram uma grande quantidade de uso de desperdício e apresentaram resultados promissores para uso na tecnologia de impressão 3D: mistura homogénea, uniformidade do filamento extrudido e adesão entre camadas durante a impressão.

Capítulo 4

Desenvolvimento e Impressão do Produto

4. Desenvolvimento e impressão do produto

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento do produto, ilustrando a aplicação dos materiais selecionados no capítulo anterior, servindo para demonstrar a viabilidade da aplicação do material num protótipo realizado na impressão 3D. Neste contexto, o presente capítulo visa detalhar o desenvolvimento do produto e o seu processo de criação. Ao longo desta etapa, aborda-se o conceito e as suas inspirações, explorando a criação do produto com a prototipagem e de testes usabilidade (impressão 3D) e, por fim, a validação.

O objetivo deste projeto é explorar a aplicação da ardósia, desde a sua utilização tradicional até à sua aplicação contemporânea na tecnologia de impressão 3D. A proposta é reinterpretar a ardósia e explorar o material analisado no capítulo 3 para criar um painel vertical com superfícies impressas em 3D, valorizando a ardósia na sua funcionalidade e valor estético no contexto atual. O painel foi concebido de forma a remeter o passado, permitindo a utilização do material num contexto arquitetónico. Trata-se de um "recriar" as casas dos trabalhadores das pedreiras, que utilizavam os resíduos de ardósia para construir as suas habitações, por falta de posses monetárias. Além disso, foi incorporado como fonte de inspiração a textura das trilobites fossilizadas como um elo de ligação, entre o passado e o futuro, celebrando a história natural ao mesmo tempo que se abraça o potencial da tecnologia. Este projeto explora a ideia da trans-matéria, onde o painel tem uma entidade de transformação e evolução. Através da utilização de materiais que simbolizam a mudança e a adaptação, o painel representa a passagem do tempo e a metamorfose da natureza.

Em suma, este conceito une elementos naturais e minerais, propondo uma abordagem, e reentrega o material na tecnologia atual, com dois propósitos: (i) preservar o património deste material; (ii) recriar um material através do resíduo de ardósia na impressão 3D e aplicar um estudo de texturas. Ao mesmo tempo, pretende-se colocar este material na tecnologia.

4.1. Trilobites fossilizadas

As triolobites são antrópodes extintos que apresentam um padrão de segmentação longitudinal distinta, composta por três lobos (Caprichoso, 2019). Estes lóbulos são divididos em três secções (figura 58) distintas que estavam articuladas entre si. Os trilobites possuíam um cefalão (cabeça), um tórax (tronco) e um pigídio (cauda) (Fósseis, n.d.). A morfologia do exoesqueleto das trilobites apresenta-se por um tamanho entre médio a grande. O cefalão apresenta caraterísticas visuais, nomeadamente formas semi-circulares a subtriangulares, com ou sem bordo. Esta zona evidencia as diferenças de cada espécie entre várias espécies de trilobites, a contar com a cauda, que possui características marcadamente distintas. Esta região apresenta uma diferenciação considerável. Apesar destas diferenças, as trilobites partilham algumas características comuns na parte superior (cabeça), nomeadamente a presença de olhos pequenos e uma região inferior da cabeça com bordos posteriores arredondados ou recortados. O tórax, que representa o corpo que acaba por se desenvolver na trilobite, é tipicamente composto por 13 segmentos. A porção central ocupa mais de 30% da largura, apresentando extremidades arredondadas. A cauda, dependendo da espécie em questão, assume uma forma oval ou triangular com tamanho médio a grande. Em comparação com as espécies mais antigas, que se distinguem por um número de segmentos mais baixos, as mais "recentes" apresentam um maior grau de segmentação (Caprichoso, 2019).

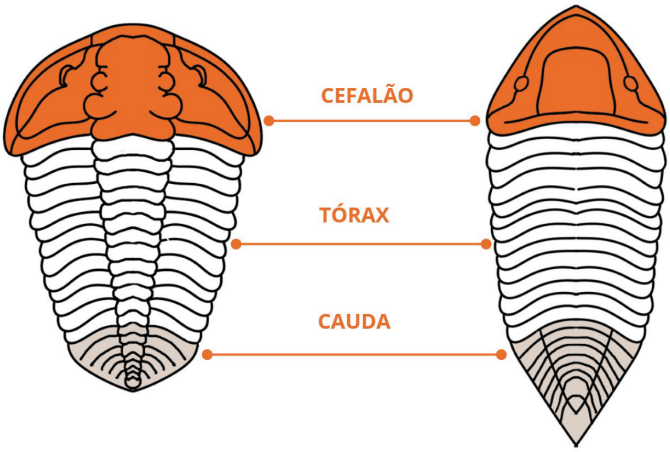


Figura 58: *Principais caraterísticas de trilobites.*
Fonte: *Adaptado pela autora de imagem de Caprichoso, 2019*

Ao longo do tempo, as trilobites sofrem uma série de modificações (figura 59) que obrigam à alteração do seu exoesqueleto. Este processo envolve a deposição das carapaças do exoesqueleto no fundo do mar e a formação de novos elementos para o substituir o antigo. Por esta razão, a maioria dos fosseis de trilobites encontrados nas rochas representam carapaças incompletas, sendo que quando elas trocam de carapaça esta subdivide-se em três partes. Os fosseis originaram-se através sedimentos, incluindo seixos e areias, que passaram por um processo à medida que a profundidade do mar aumentava, originando assim ardósia e outras rochas xistentas que permitiram preservar os exoesqueletos e as carapaças (Fósseis, n.d.). Através de esse processo é possível analisar as evoluções convergentes, por meio caracteres morfológicos, durante essa mudança. O exoesqueleto rompe nas articulações entre os seus segmentos e a trilobite absorve a água para aumentar o tamanho do seu corpo antes de desenvolver um novo exoesqueleto (Bell, 2013).

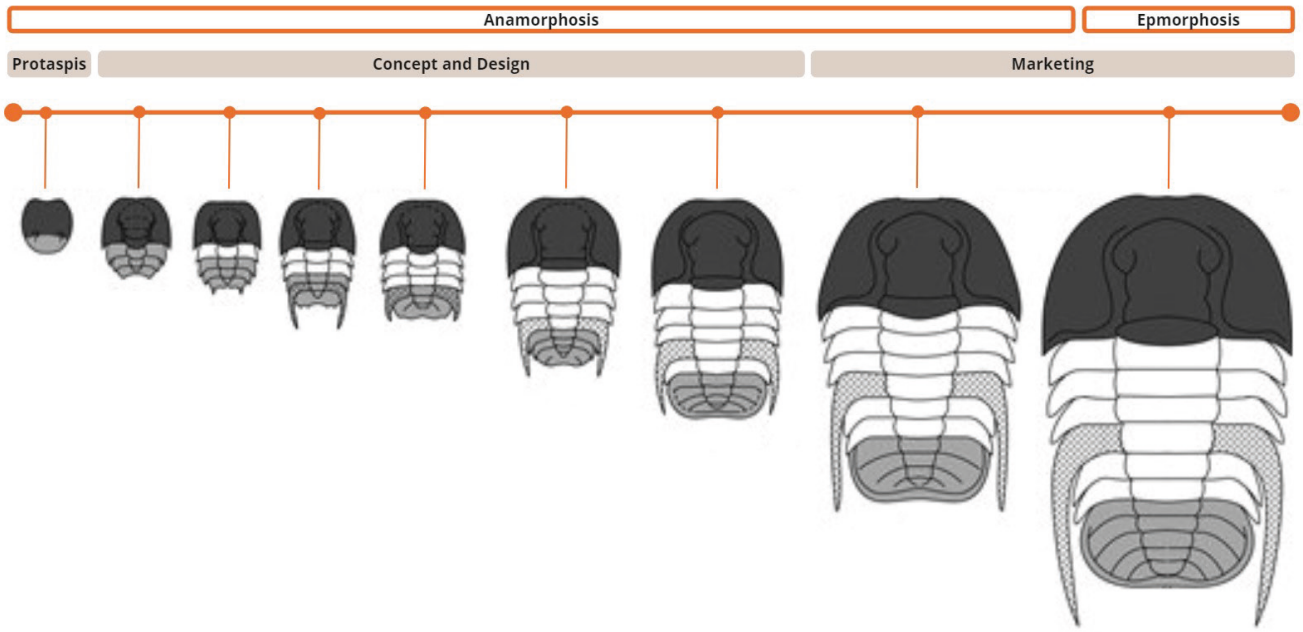


Figura 59: *Evolução convergente por carateres morfológicos*
Fonte: *Adaptado pela autora de imagem de (Hopkins, 2017).*

A primeira referência às trilobites em Portugal (figura 60) encontra-se na área de Portalegre. Contudo, encontram-se também em vários locais com xisto e ardósia, como em S. Félix de Laúndos, Valongo, Amêndoa (Caprichoso, 2019).

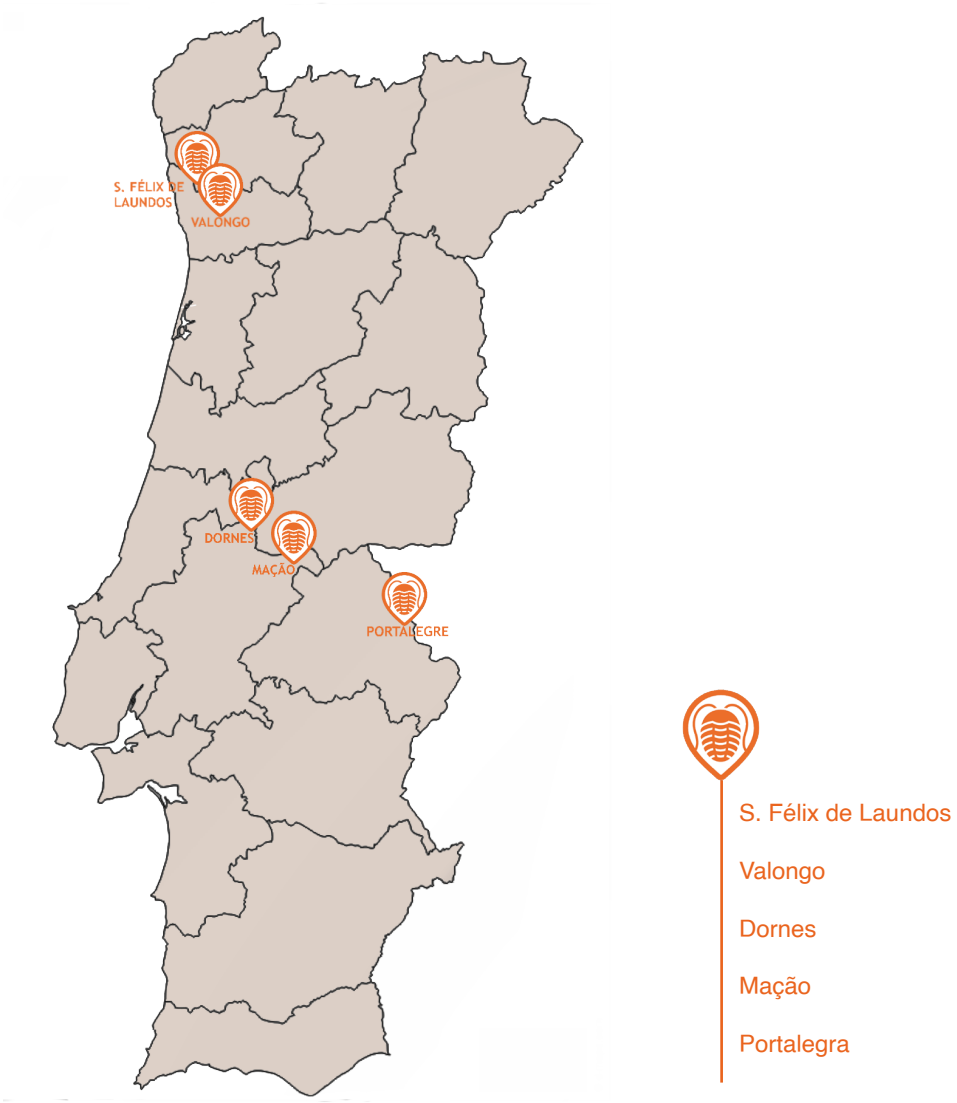


Figura 60: *Áreas de trilobites em Portugal*
Fonte: *Adaptado pela autora de gráfico de (Caprichoso, 2019).*

O Anticlinal de Valongo é uma estrutura geológica assimétrica, em que se encontram diversas trilobites e fósseis, recolhidos na estreita faixa que se estende, com direção NO-SE, de Laúndos até Valongo. É uma zona conhecida pelo seu interesse geológico-mineiro e que se encontra localizado no noroeste de Portugal continental, mais concretamente nos concelhos de Valongo, Paredes e de Arouca (E. Gonçalves, 2013). A formação de Valongo deve-se à abundância e variedade de fósseis (P. Gonçalves, 2018), não só as trilobites, mas também fósseis como tentaculites, artículos de crinoides isolados, braquiópodes e bivalves (Domingos, 2014).

4.2. Trans-Matéria

O termo “materialidade” é referente à seleção e a utilização de materiais, com especial incidência nas suas propriedades e no impacto que estas

propriedades têm nos elementos sensoriais e estruturais. O conceito "trans-matéria" no Design engloba diversos fatores (figura 61), desde os aspetos estéticos e funcionais até à sustentabilidade e experiência do utilizador (Materiality In Design, 2024). Além disso, a experiência dos indivíduos é influenciada pelas qualidades táteis e visuais do material, proporcionando sensações. A experiência do utilizador permite ter a perceção do produto e registar pontos importantes, com base nos conhecimentos captados durante essa interação. Essa interação provoca ao utilizador uma experiência emocional durante a utilização do produto, uma experiência estética, com uma noção de satisfação, e um significado, através de memórias atribuídas ao produto. O produto pode provocar emoções positivas ou negativas conforme as necessidades do utilizador e as suas expectativas (satisfação emocional) (Hopkins, 2017).

Figura 61: *Interação do utilizador com o produto*
Fonte: *Adaptado pela autora de gráfico de (Ribeiro, 2015).*

No contexto da sustentabilidade, os conceitos de reciclagem e reutilização são semelhantes, uma vez que em ambos há a transformação e a reutilização de materiais. Porém, existem também diferenças notáveis entre os dois. A reciclagem envolve uma alteração formal e estrutural do objeto do material do objeto, enquanto a reutilização implica a alteração e aplicação de uma nova função ao próprio objeto.

Ao contrário da reciclagem, a reutilização não altera as propriedades químicas ou físicas do objeto (Barbero & Cozzo, 2009). Na reciclagem existe um efeito cascata (Barbero & Cozzo, 2009; Cunha et al., n.d.), podendo observar-se que o produto se degrada e se torna inutilizável numa determinada fase. Subsequentemente, o material pode ser reaproveitado como recurso energético (Cunha et al., n.d.), o que leva à perda das qualidades estruturais e químicas (Barbero & Cozzo, 2009). Por outro lado, a reciclagem pós-consumo e pré-consumo tem origem em produtos que foram descartados pelo consumidor final, o que nem sempre pode ser viável em termos de reciclagem (Cunha et al., n.d.).

O processo de reciclagem pós-consumo consiste na transformação de materiais ou componentes de um produto no final da sua vida útil. A reciclagem pré-consumo é um processo que avalia a necessidade de um produto no (Barbero & Cozzo, 2009). Para otimizar o potencial económico e ambiental, é essencial que os produtos não só sejam viáveis

ao serem reformulados e reciclados na sua vida útil, como também sejam desenvolvidos física e emocionalmente duráveis. Isto implica incentivar a conceção de produtos que garantam um design mais duradouro e durante mais tempo (Circular Business Models, 2021).

A partir dessa informação da “trans-matéria” dá-se uma funcionalidade adaptativa, explorando-se como o produto pode responder ativamente ao ambiente ou ao uso, oferecendo uma experiência mais personalizada e funcional. Criam-se produtos que não só melhoram a experiência do usuário, mas também contribuem para a sustentabilidade ao adaptar suas funções, como aplicações dos resíduos de ardósia num produto.

4.3. Fachadas

As fachadas têm como aplicação de reforço de isolamento térmico através do exterior, interior ou isolamento na caixa-de-ar Este método veio reduzir anomalias encontradas nas fachadas habituais na patologia das construções, das paredes de fachadas – problemas que criam fissuras, humidade e condensação e degradação dos materiais (Macedo & Mateus, 2011; B. Silva, 2015).

As fachadas ventiladas (figura 62) consistem num sistema que permite regularizar a humidade devido à circulação do ar em movimento e ao isolamento térmico. Inicialmente, as fachadas eram concebidas apenas para proteger as paredes do ambiente externo, com aplicações de madeira, ardósia ou zinco, em forma de escamas. A evolução para a criação da caixa de ar permitiu um maior conforto térmico e acústico, uma instalação e manutenção com maior eficácia e rapidez, devido aos componentes de fixação (parafusos, suportes, perfis e esquadros) e a proteção do impacto direto dos raios solar na estrutura (Blazius, 2019). A caixa de ar cria um fluxo de ar contínuo na cavidade para eliminar a condensação e a humidade, proporcionando dissipação de calor. Esse fluxo atua por condução entre superfícies limites, opostos na caixa de ar (B. Silva, 2015).

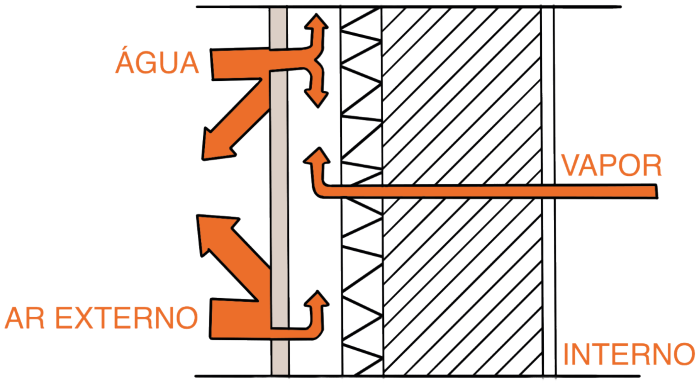


Figura 62: *Funcionamento da caixa de ar*
Fonte: *(Silvia, 2015). desenhado pela autora*

Para garantir uma ventilação eficaz, deve-se garantir pelo menos 2 cm de ar livre. No caso de espessuras convém de ter pelo menos 50 mm para cima, onde é feita a circulação natural de ar, assistida com transferência de calor. A espessura devido à densidade provocada, observa-se que quanto maior for a espessura da caixa de ar, maior será a transferência de calor por convecção. As zonas de abertura da ventilação devem-se ao sistema de suporte, com a função de suportar o peso do revestimento e outras subcamadas isolantes. O suporte permite uma maior facilidade de reabilitação e tem a vantagem de amortecer o peso de cada revestimento, absorvendo as possíveis deformações. Inicialmente, a fixação mais frequente era visível, passando para uma invisível, sem haver grandes alterações no processo ou até no tipo de encaixe (B. Silva, 2015). A figura 63 serve para ilustrar as caraterísticas da fixação visível e invisível.

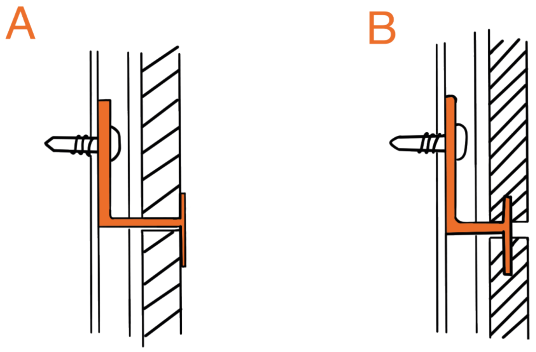


Figura 63: *Sistema de suporte: A sistema visível e B sistema invisível*
Fonte: *(Silvia, 2015). desenhado pela autora*

4.4. Jardim Vertical

O Jardim Vertical (figura 64) é um termo comum para mencionar a todas as formas de superfícies verdes (Manso & Castro-Gomes, 2015), que abrange duas tipologias principais: fachadas verdes e “living walls” (paredes vivas), que se subdivide com base do tipo de construção e manutenção(Barbosa & Fontes, 2016). A fachada verde são aplicações de plantas por toda a parede de forma indireta (inclusão de estrutura e suportes) ou direta (diretamente na parede (Manso & Castro-Gomes, 2015), com facilidade de construção e manutenção(Barbosa & Fontes, 2016). A parede viva já inclui materiais e tecnologias para suportar uma grande quantidade e variedade de plantas. O sistema de construção e manutenção é mais complexo, pelas suas aplicações de telas inseridas individualmente, mesmo tendo a vantagem de serem leves e permeáveis (Manso & Castro-Gomes, 2015).

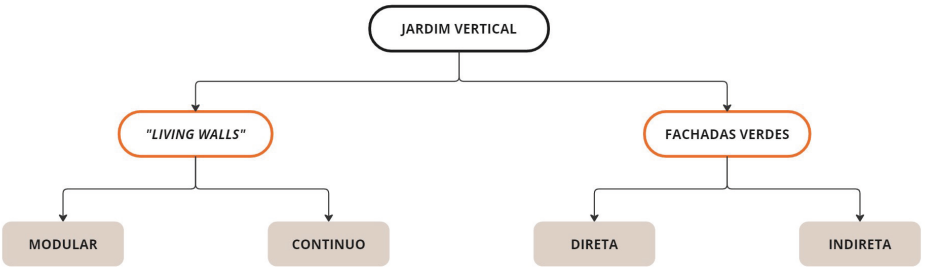
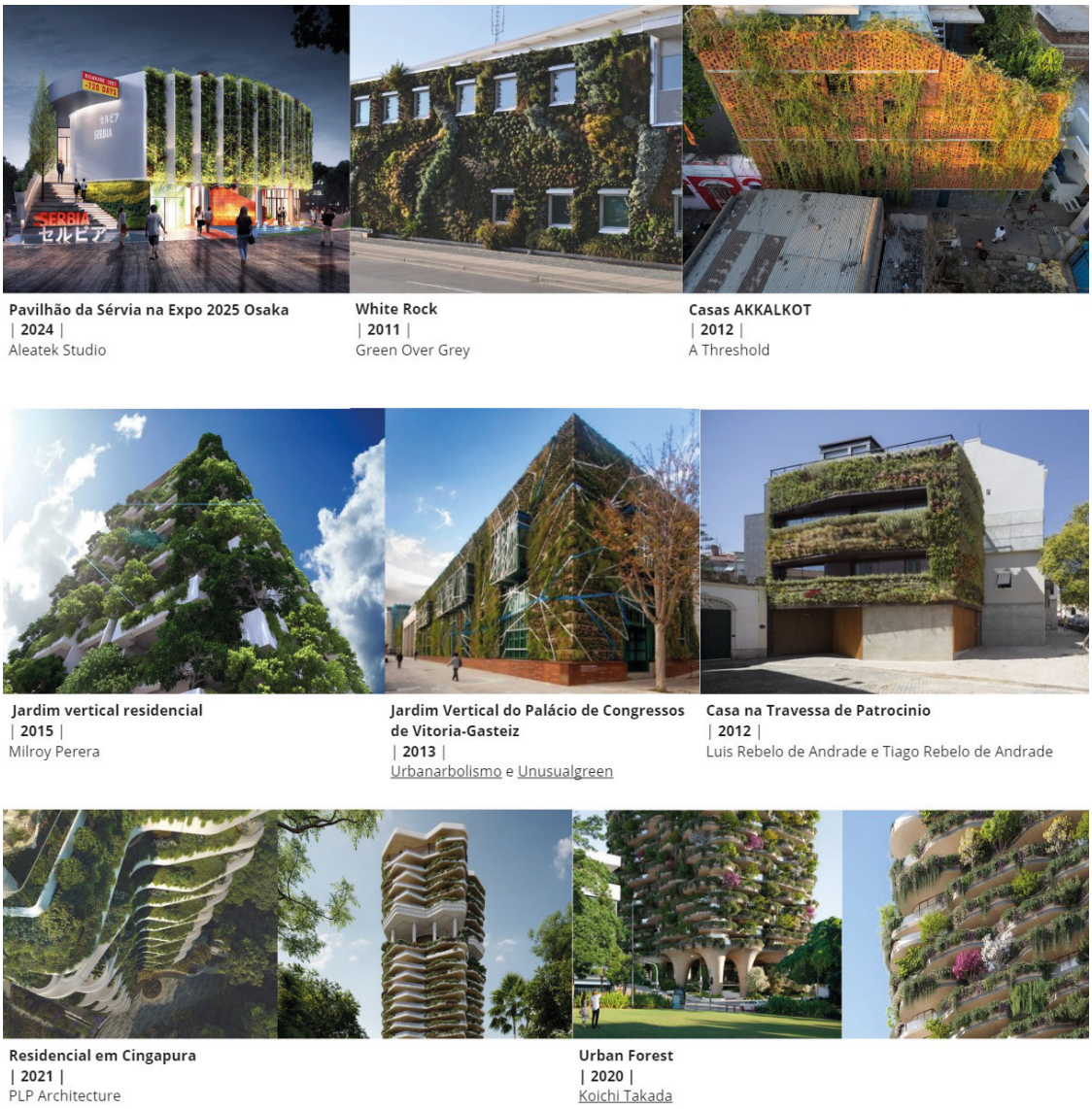


Figura 64: *Classificação das paredes verdes*
Fonte: *Adaptado pela autora de gráfico de (Manso & Castro-Gomes, 2015).*

Este conceito surgiu como uma alternativa à poluição visual da urbanização, beneficiando também no desempenho dos edifícios e o que se encontra no seu entorno. Visa a integração do edifício com o envolvente, demonstrando impactos ambientais, sociais e económicos (Muñoz et al., 2019): soluções como o termoacústico, o isolamento térmico e acústico (Santos, 2021), a diminuição do calor urbano e energética da edificação (Muñoz et al., 2019).

É também de extrema importância referir as consequências e cuidados a ter, prevenindo qualquer deformação do produto. O jardim vertical requer cuidados na sua manutenção, de forma a prevenir a penetração da vegetação em fendas, morte da planta, pela falta de nutrientes e de rega. Cuidados esses, periodicamente nas podas, adubações, limpeza dos "vasos", e até mesmo a substituição da planta (Santos, 2021).

Figura 65: *Jardins verticais*
Fonte: Compilação autora - do https://www.archdaily.com/



Pavilhão da Sérvia na Expo 2025 Osaka
| 2024 |
Aleatek Studio

White Rock
| 2011 |
Green Over Grey

Casas AKKALKOT
| 2012 |
A Threshold

Jardim vertical residencial
| 2015 |
Milroy Perera

Jardim Vertical do Palácio de Congressos de Vitoria-Gasteiz
| 2013 |
Urbanarbolismo e Unusualgreen

Casa na Travessa de Patrocinio
| 2012 |
Luis Rebelo de Andrade e Tiago Rebelo de Andrade

Residencial em Cingapura
| 2021 |
PLP Architecture

Urban Forest
| 2020 |
Koichi Takada

Os sistemas de revestimentos cerâmicos podem ser aplicados em paredes de diferentes alturas e formas (figura 65). O material em causa apresenta uma série de vantagens. Por ser pré-fabricado, simplifica a implementação no espaço, podendo o próprio utilizador fazer a sua própria manutenção (Santos, 2021). Para além disso, o material destaca-se pela sua resistência e durabilidade devido ao processo de cozedura. Em comparação com outros (B. Silva, 2015), não apresenta um custo elevado (Santos, 2021).

4.2. Desenvolvimento do produto

Com base na investigação do conceito, o projeto tem como objetivo criar dois módulos funcionais, visualmente estéticos e orgânicos, para a montagem de painéis verticais decorativos e/ou de painéis de jardim vertical. Assentes no uso tradicional passado da ardósia, pensam o retorno da sua aplicação, pelo menos dos seus resíduos, às fachadas e interiores dos edifícios. É estudada a introdução de texturas inspiradas em trilobites, pedra de ardósia e a ondulação da areia, de modo a conectar o passado ao presente, tal como o uso de um material cerâmico (tradicional) na tecnologia de impressão 3D (atual) o irá fazer. Neste processo, a trans-matéria será refletida numa narrativa de evolução e transformação.

4.2.1. Considerações

As restrições técnicas da produção de um painel (figura 66) e do uso da Impressão 3D tomaram elevada importância no desenvolvimento da solução. O módulo estrutural foi alvo de preocupações acrescidas nos encaixes e peso, nomeadamente quando necessitar de suportar o peso adicional da planta e quando for empregue no exterior, suscetível a fatores de intempérie: vento, chuva e exposição ao sol. O tipo de estrutura e a forma da sua manutenção são pontos fulcrais no processo de desenvolvimento. É preciso garantir que uma estrutura seja estável e resistente, num ambiente externo ou interno. Estes fatores influenciam igualmente o tipo de manutenção. É essencial ter em conta a facilidade de substituição de um módulo em caso de fissuras ou outros incidentes, a simplificação de manutenção das plantas de corte e rega e a potencial obstrução de falhas ou entupimento.

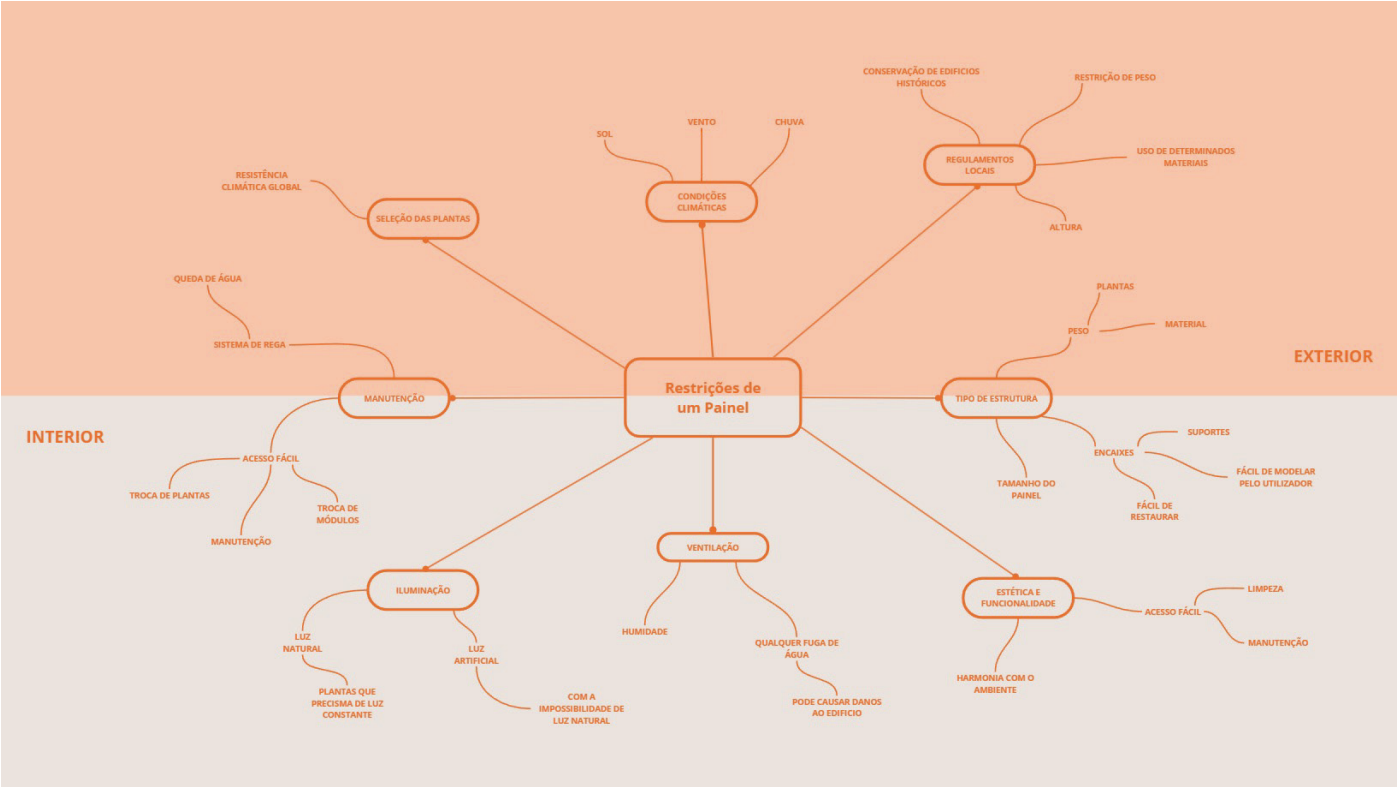


Figura 66: *Brainstorming de restrições*
Fonte: *Autora, 2024.;*

Através do processo de brainstorming, podem ser identificados os vários constrangimentos técnicos associados a um painel de exterior em comparação com um painel de interior. Quanto ao painel das fachadas exteriores (figura 67), para além da estrutura, manutenção e condições climáticas, têm sido impostos regulamentos políticos: normas de construção quanto ao peso, altura e determinados uso de matérias, de forma assegurar a segurança local. Além disso, a conservação de edifício histórico tem restrições para não haver alterações estéticas de fachadas.

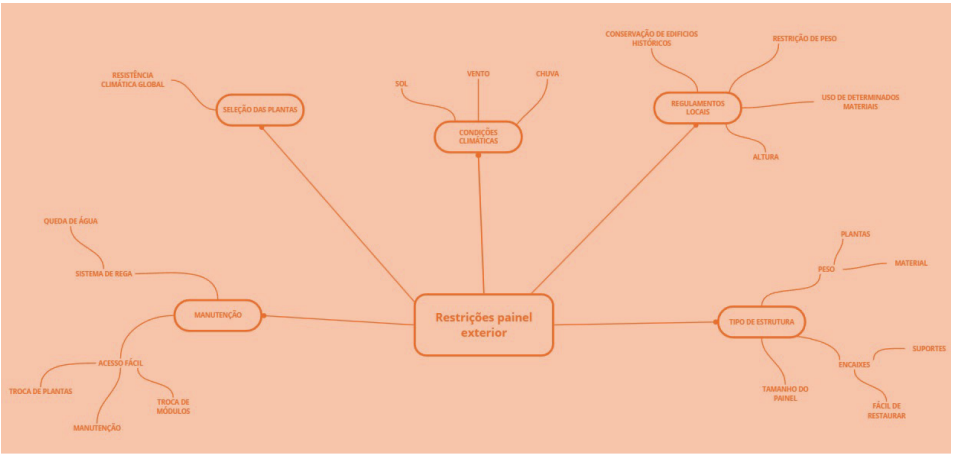


Figura 67: *Brainstorming de restrições do painel exterior*
Fonte: *Autora, 2024.*

A fachada interior (figura 68) já tem restrições ligadas mais ao funcionalismo. O módulo de jardim vertical tem a preocupação da incidência da luz exterior, dependendo da seleção das plantas. Por vezes, tem a necessidade de luz constante ou a incorporação de uma luz artificial da substituição do mesmo, o que acaba por criar a necessidade de ter uma maior facilidade de acesso na troca das plantas ou na troca de módulos por haver peças danificadas e criar humidade ou as raízes entrarem nas rachaduras e danificar a estrutura da casa.

A estética aqui também não deixa de ser importante. A necessidade de incorporar harmonia ao ambiente, acaba por ser um dos motivos presentes na incorporação dos módulos no espaço interior. A caixa de ar aplicado aos módulos também permite regularizar a humidade devido à circulação do ar em movimento e ao isolamento térmico (Blazius, 2019).

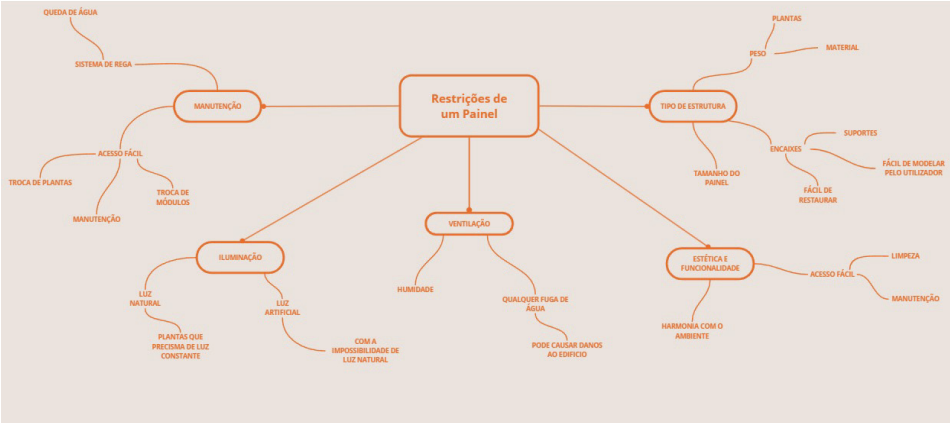


Figura 68: *Brainstorming de restrições do painel interior*
Fonte: *Autora*

O foco inicial deste projeto será nos painéis interiores, dada a ausência de testes técnicos, como os de resistência, que são necessários para obter uma compreensão abrangente do assunto. Estes ensaios serão desenvolvidos em trabalhos futuros.

Tendo em conta os condicionalismos acima referidos, os principais objetivos da conceção dos painéis interiores são: (i) a manutenção e o tipo de estrutura, devido à facilidade de acesso para a limpeza e modificação dos módulos, à acessibilidade simples dos painéis e à possibilidade do utilizador a sua própria parede e fazer a sua manutenção; (ii) a ventilação, permitindo a redução da humidade e a libertação de vapores internos.

Considerações de impressão 3D acabam por ser também pertinentes no desenvolvimento, por serem vantajosas para a produção dos módulos na tecnologia. Os pontos envolvem uma série de restrições, incluindo custos de produção, tempo de impressão, volume e medidas do produto e complexidade geométrica. Para além dos parâmetros de material e de impressão mencionados no subcapítulo 2.2.2, as restrições indicadas merecem uma análise no desenvolvimento do painel.

As considerações mencionadas visam articular o produto com o objetivo, e as principais restrições e considerações. O painel tem a necessidade de

incorporar um material que garanta durabilidade, como a resistência ao desgaste e à degradação. Tem de mostrar ser viável a incorporação do material na tecnologia e não no método tradicional, devido ao custo de produção e tempo. A implementação do conceito da trans-matéria e da aplicação da textura vem demonstrar a viabilidade do uso da extrusora aplicada no produto. Na manutenção é preciso ter em mente o tipo de encaixes, suportes e como poderia garantir-se uma maior facilidade da manutenção das plantas e de o utilizador modelar a sua própria parede.

Os painéis subdividem-se em dois módulos: um composto por um jardim vertical (módulo B) e o outro por um painel vertical (módulo A). O painel de jardim vertical é uma solução económica, não só devido ao seu design complexo, mas também porque permite ao utilizador adquirir os módulos de que necessita separadamente e montá-los com o painel vertical, que poderia ser produzido por um método convencional. O módulo A é produzido em grande escala, enquanto o módulo B é incorporado de acordo com a preferência do utilizador.

4.2.2. Aplicação do conceito

Com base no conceito e objetivos estudados, foi realizado uma recolha de imagens (figura 69) que forneceram como uma fonte direta e indireta de inspiração, que pode ser aplicado na forma e textura do produto. A fonte direta demostra uma compilação de produtos já existentes no mercado, em que é analisado os seus encaixes e as suas formas. A fonte indireta tem presente as inspirações aplicadas à textura – morfologia das trilobites, textura da pedra, a forma da ondulação da areia de maneira a sugerir movimento que se encontra presente também na textura da rocha de ardósia e devido a presença do exoesqueleto no fundo do mar – que é trabalhada a ideia da trans-matéria. Com a presente ideia de reflexão sobre deposição das carapaças e do exoesqueleto imortalizados nas rochas, e a sugestão de um estado anterior de vida e movimento, cria uma narrativa de evolução e mudança.

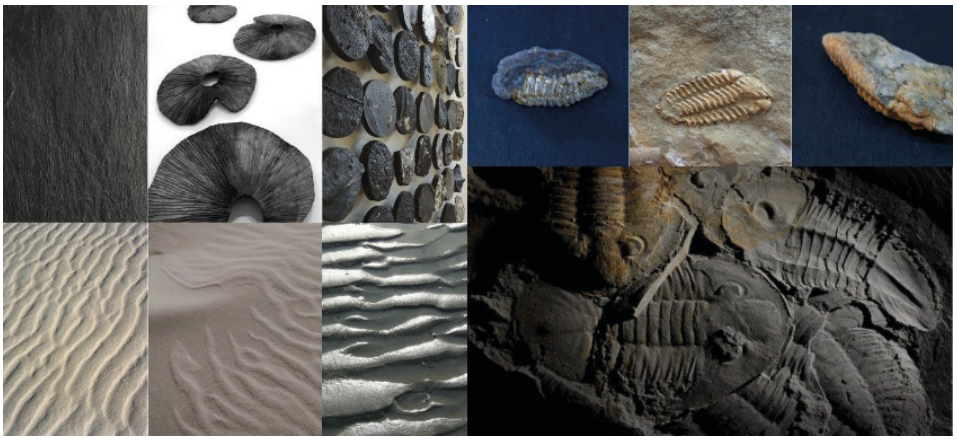


Figura 69: *Texturas das trilobites, ardósia e areia Compilação da autora*

A fonte direta do produto (figura 70) foi realizada uma pesquisa de imagens, procurando inspirações de referências de encaixes e visa a viabilidade na aplicação da textura para o desenvolvimento do produto, como podem ser observados na figura seguinte.

Figura 70: *Painéis verticais em impressão 3D.*
Compilação da autora

Nos projetos, apresenta possíveis encaixes que poderão ser benéficos no desenvolvimento do produto. No "*Piastrelle in Ceramica*", do IOUS Studio, apresenta o sistema invisível simples, abordado no subcapítulo 4.3. (fachada), que demonstra um encaixe simples, barato e simplifica a manutenção. Em contrapartida, o projeto "*Seed Stitch Wall*" apresenta uma instabilidade visível, apesar da sua maior acessibilidade e facilidade de manutenção, facilitando assim a manipulação por parte do utilizador. Os restantes projetos já foram incorporados diretamente na parede, resultando numa maior dificuldade de manutenção. O impacto da textura nestes projetos é uma caraterística notável. Tendo em conta o atual enfoque na integração de técnicas tradicionais e artesanais com a tecnologia em impressão 3D. Podendo avaliar o potencial desta tecnologia quando aplicada a um material cerâmico. Assim, o âmbito dos módulos é montar painéis, em que tem presente a textura permanente da trilobite e o módulo dois a implementação de jardim vertical, em que ambos apresentam um encaixe simples entre eles.

4.2.3. Desenvolvimento dos módulos

Uma vez abordados os fundamentos, o ponto de partida para o desenvolvimento do produto foi centrar-se na forma, com base na morfologia da trilobite, e considerar como esta forma poderia influenciar a aplicação da textura.

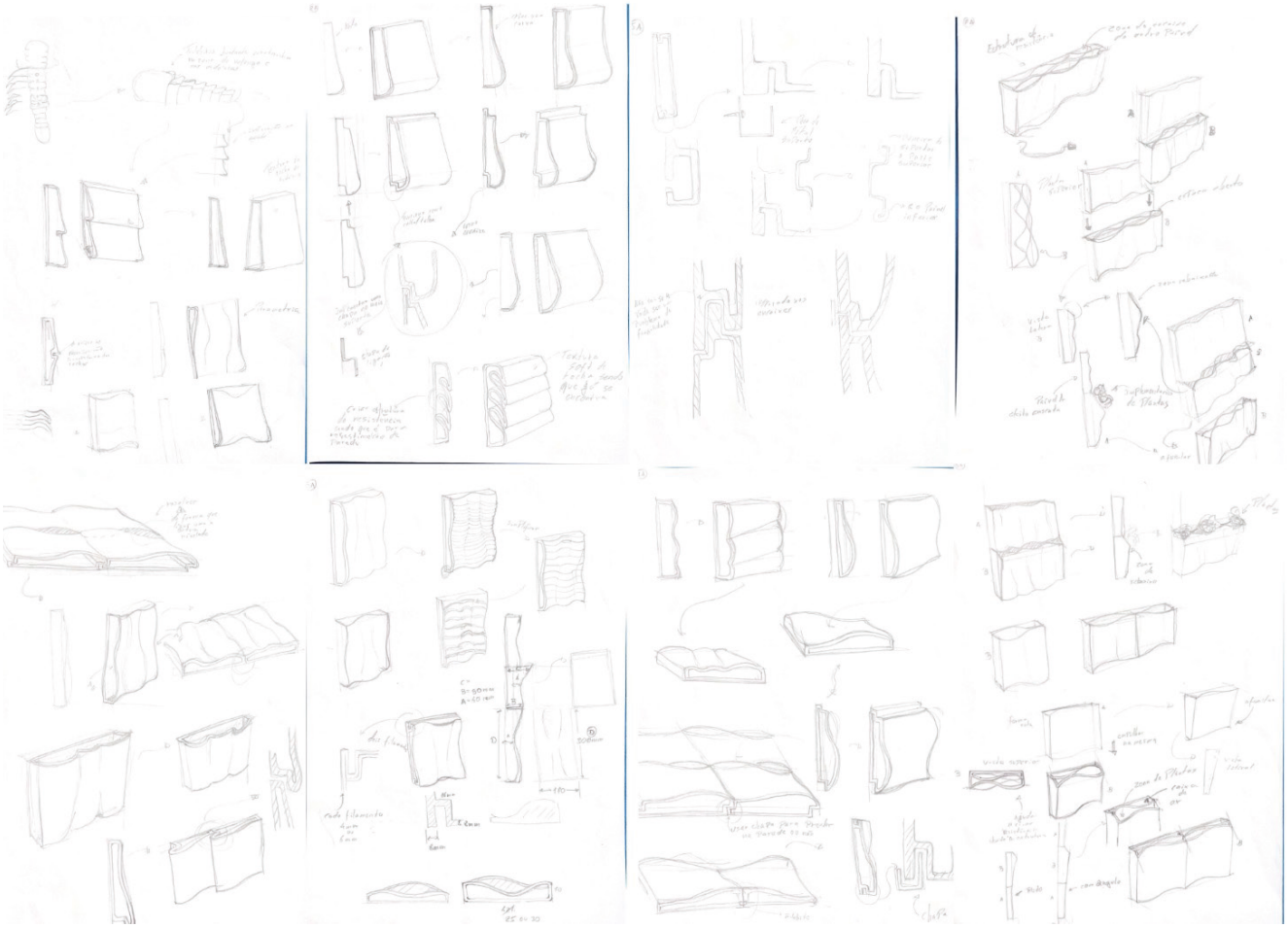


Figura 71: *Sketch´s*
Fonte: *Autora*

As formas (figura 71) começaram a ser desenvolvidas através da morfologia da trilobite, com o foco do movimento do exoesqueleto da espécie, o que levou à forma lateral. Devido à sua estatura, lobo central e lateral. Em que a "coluna" proporciona como suporte estrutural e distribui forças ao longo do comprimento do corpo. Foi desenvolvido formas simples com a presença de uma espécie de "barriga" e a sobreposição entre as peças, criando assim a sensação de movimento nos painéis, simbolizando o conceito de trans-matéria. Em seguida foi desenvolvido os possíveis métodos de encaixe nos suportes, de forma a permitir uma manutenção simplificada e dar a possibilidade ao utilizador modular o próprio painel. O processo de desenvolvimento, dos encaixes sofreram uma transformação, passando de uma estrutura visível para uma estrutura invisível. A integração de "macho e fêmea" diretamente nos módulos serviria para reforçar o painel e representar a sobreposição.

4.2.4. Aplicação das texturas nos módulos

Já abordando a incorporação da textura, foram realizados vários estudos de aplicação de tipos de texturas. Devido a viabilizar o tempo, e à necessidade de utilizar a impressora 3D "*Delta Wasp 40100*" no contexto acadêmico, foram realizados testes de impressão (figura 72) de filamento PLA na impressora "*Anet A8*" com o objetivo de explorar uma nova textura e visualizar a geometria formal dos módulos. Apesar das diferenças nas caraterísticas da cerâmica em relação ao PLA, foi possível avaliar a influência da textura nos módulos.

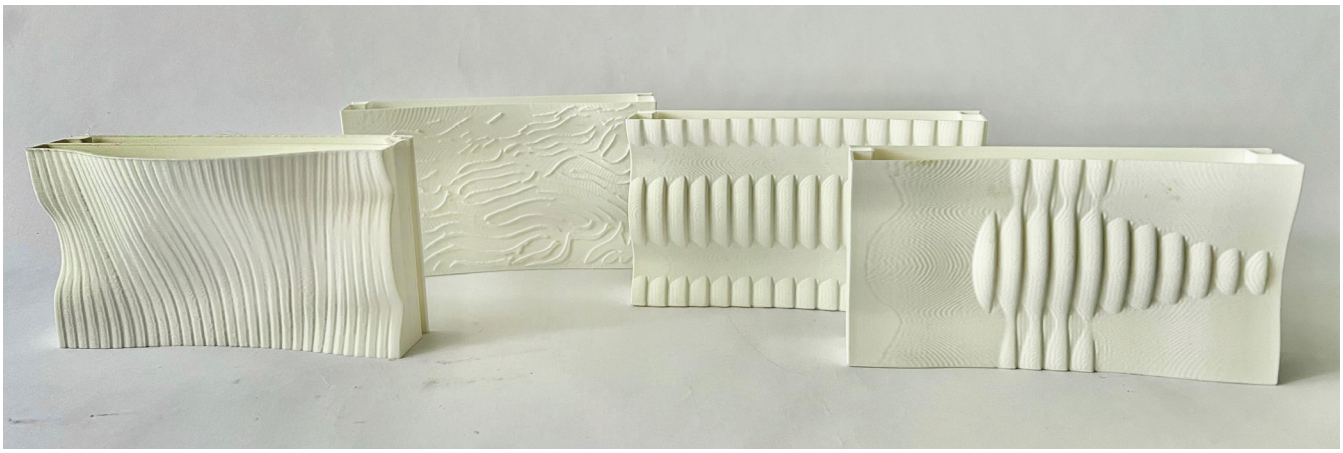


Figura 72: *Testes de impressão em PLA*
Fonte: *Autora*

Foi representado nas superfícies dos módulos, os fósseis de trilobites, ao incorporar o relevo na impressora 3D. Visa a evidenciar o relevo presente nas rochas de ardósia provocadas pelas carapaças deixadas no fundo do mar. Para reforçar a ideia de trans-matéria, foi recriado os fósseis, com as trilobites modeladas de forma a parecerem emergir gradualmente do painel, como se estivessem no processo de transição do interior da rocha para o seu exterior. Esta variação de profundidade ao longo do painel permite realçar a ideia da narrativa da evolução.

A textura da areia (figura 73 e 74) também foi estudada na implementação dos módulos, sendo que os fósseis originaram através de sedimentos, seixos e areia que originou ardósia. A ideia foi sugerir movimento criando gradientes e transições entre diferentes texturas no painel, reforçando a ideia de trans-matéria. De forma a criar movimento com o sedimento da areia, e a emersão da textura do painel, foi estudado uma textura simples e orgânica, de forma a tornar uma peça complexa e dinâmica.

Figura 73: *Padrão para o modelo 3D.*
Fonte: *Autora*

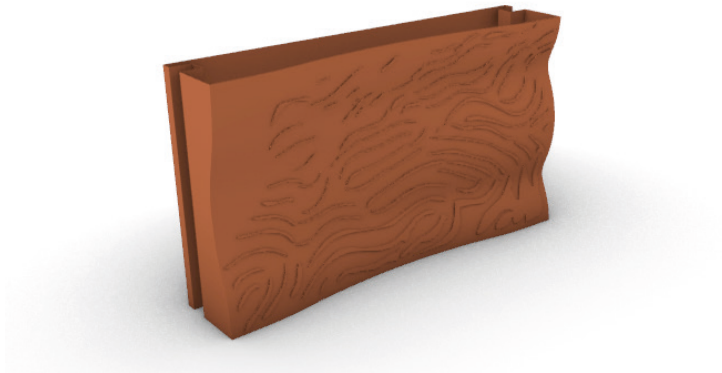


Figura 74: *Aplicação da textura - areia no modelo 3D*
Fonte: *Autora*

Na seleção dos módulos, é essencial considerar uma série de fatores, incluindo a durabilidade do painel, que deve permitir um acesso fácil para manutenção; o custo, a fim de verificar se é mais viável incorporar o material em processos tradicionais ou tecnológicos; o espaçamento e a espessura dos suportes; as dimensões da caixa de ar; a geometria e o impacto da textura no painel; e se o módulo é uma opção viável para imprimir.

Foram inicialmente selecionados dois módulos (figura 75) para investigação. O primeiro, designado por módulo A, foi projetado sem a incorporação de plantas e considerou-se principalmente em considerações estéticas. O segundo, designado por módulo B, foi concebido com a incorporação de plantas e centrou-se sobretudo em considerações funcionais. A seleção foi definida pelos desenhos expostos nas figuras 72, que apresentavam uma série de caraterísticas. Estes incluíam módulos com uma textura subtil e uma forma geométrica mais acentuada. Por motivos que serão mencionados nos testes de usabilidade do produto, foi selecionado um outro módulo com base no estudo das texturas em filamento PLA na

impressora "*Anet A8*". O módulo final (figura 75) vai mais em conta ao conceito da aplicação da textura do exoesqueleto da trilobite e a ideia da trans-matéria aplicada num produto.

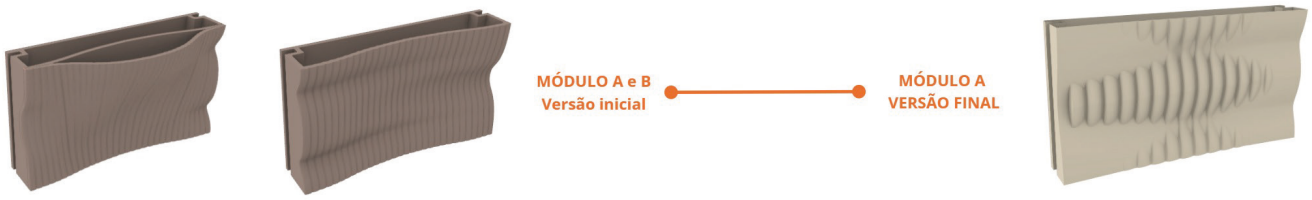


Figura 75: *Modelação da versão inicial para a final*
Fonte: *Autora*

4.5. Testes de usabilidade do produto

Após o estudo e o desenvolvimento do produto, iniciou-se a preparação da impressão, de forma avaliar a geometria do produto com a composição selecionada (70% de faiança, 30% de pó de ardósia, e a soma de 25% de pó de tijolo). O protótipo foi pensado de forma a simplificar o processo de impressão. Durante a impressão, para além dos parâmetros de avaliação mencionados no subcapítulo 2.2.2. (Impressão 3D em cerâmica), apresentam questões necessárias de avaliar, como: complexidade geométrica, que embora a tecnologia avançada permita fazer peças geometricamente complexas, existe uma necessidade de suportes que não é viável num material cerâmico; o controlo de materiais da fluidez e viscosidade e ter a certeza que o material se mantêm homogêneo, para não existir qualquer interrupção na extrusão, devido a formação de bolhas de ar; o percurso continuo de impressão, de forma a reduzir o tempo e não criar deformação na peça; durante este processo é preciso ter atenção ao bocal, para não deformar ao empurrar as camadas; a quantidade de material, para ver se é necessário interromper o processo; e por fim a compressão do material que é aplicada na impressora, onde o ar é comprimido e empurra o material até o extrusor.

O modelo 3D foi digitalizado em g-code a partir do Software Simplify, com aplicações compatíveis à impressora *Delta Wasp 40100*. Estas incluíam um diâmetro do bocal 6 mm; altura da primeira camada 2 mm, uma altura da primeira camada 50% e uma velocidade de 100%. A impressora tem um volume de 400x, 400y e 1000 z, pelo que o produto deve estar dentro destas medidas, o que não foi uma restrição. Devido a erros nos códigos da malha, o produto teve de ser passado para o plugin Grasshopper no software Rhino, o que permite avaliar a trajetória de impressão e também beneficia o tempo de impressão.

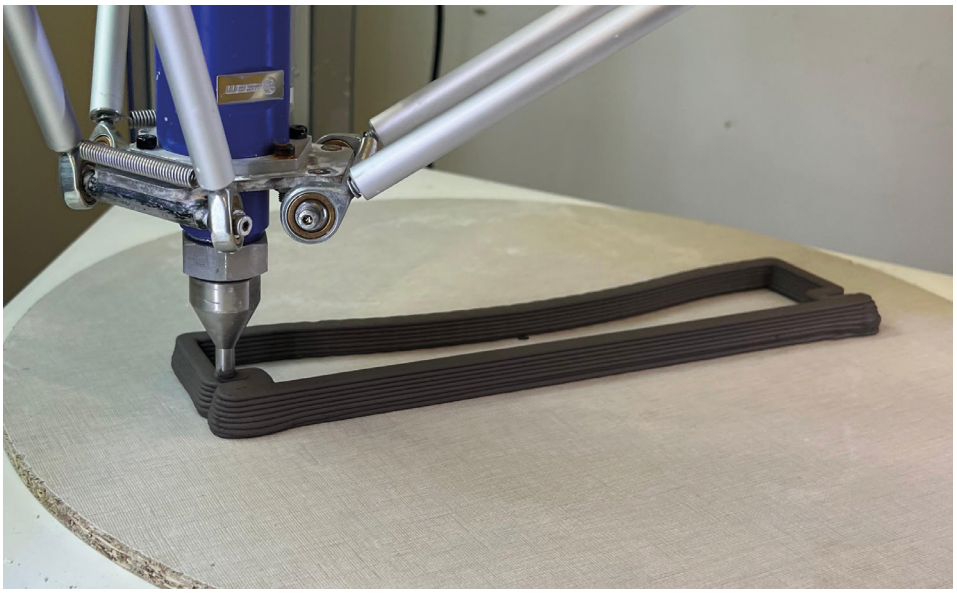


Figura 76: *Primeiras camadas: do módulo A*
Fonte: *Autora*

Figura 77: *Primeiras camadas: do módulo B*
Fonte: *Autora*

A impressão foi efetuada com um bocal de 6 mm, de acordo com a espessura desejada do módulo. Esta abordagem permitiu reduzir o tempo de impressão e evitar um trajeto de extrusão repetitivo. O módulo A (figura 75) baseia-se principalmente na textura aplicada, enquanto o módulo B (figura 77) necessita um percurso mais longo, aumentando assim o tempo de produção devido a linha de filamento situado no centro do produto. O tempo de impressão da peça B foi de 1h20min, o que pode não ser viável em grandes quantidades de produção de painel. Uma solução potencial para estes problemas é passar o modelo do software Rhinoceros 3D para o plugin Grasshopper, onde o percurso pode ser controlado pelo utilizador e subsequentemente executado pela máquina. Esta abordagem pode resultar numa redução do tempo de impressão, criando menos movimentos adicionais.

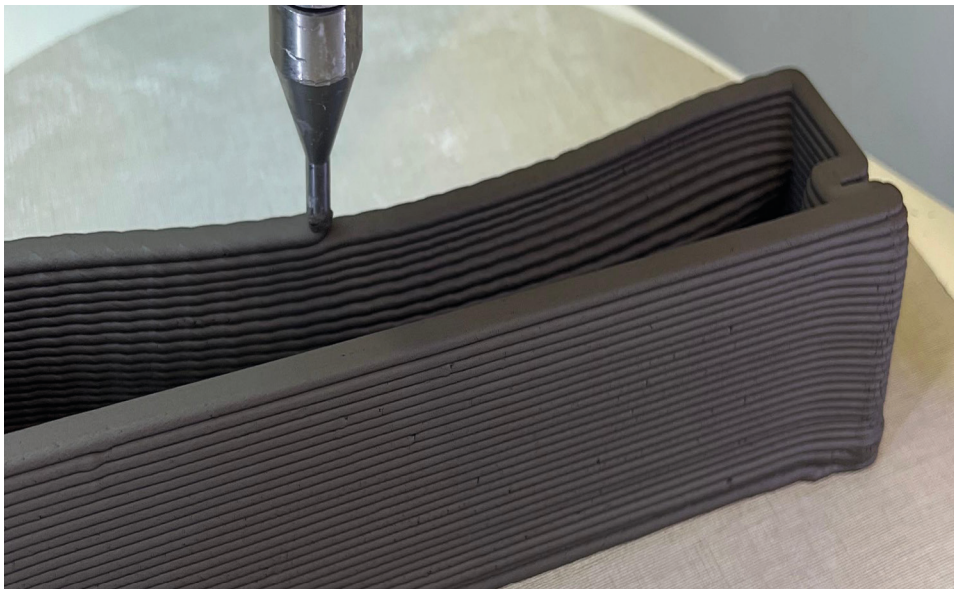


Figura 78: *Pormenor do finalmento: do módulo A*
Fonte: *Autora, 2024.*

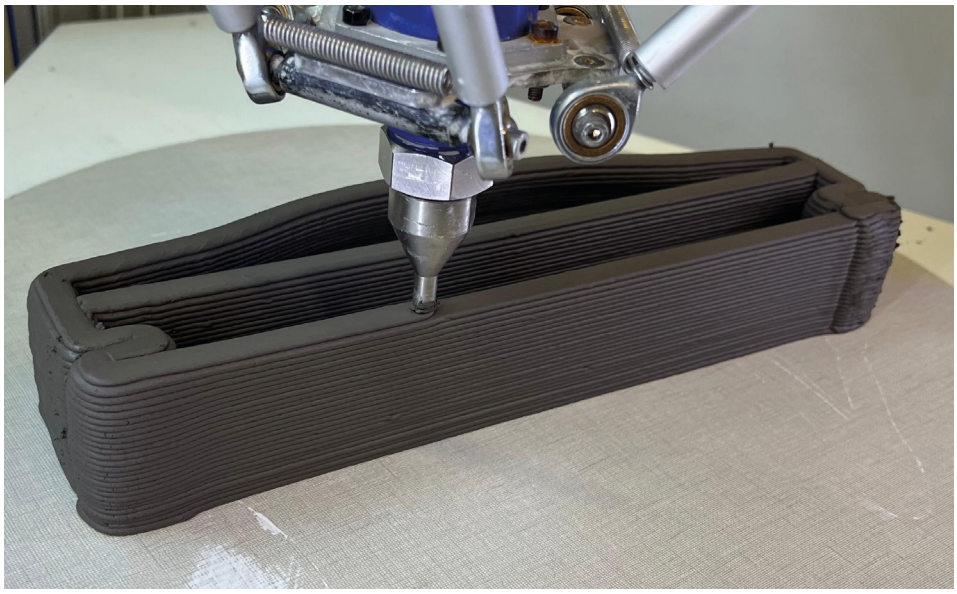


Figura 79: *Pormenor do finalmento: do módulo B*
Fonte: *Autora, 2024.*

Durante o processo de impressão, presente na (figura 78 e 79) é de notar que a zona onde é suposto servir de encaixe tem a necessidade de criar uma maior abertura, devido à espessura da camada do módulo e pensando que irá acontecer uma retração após a cozedura.

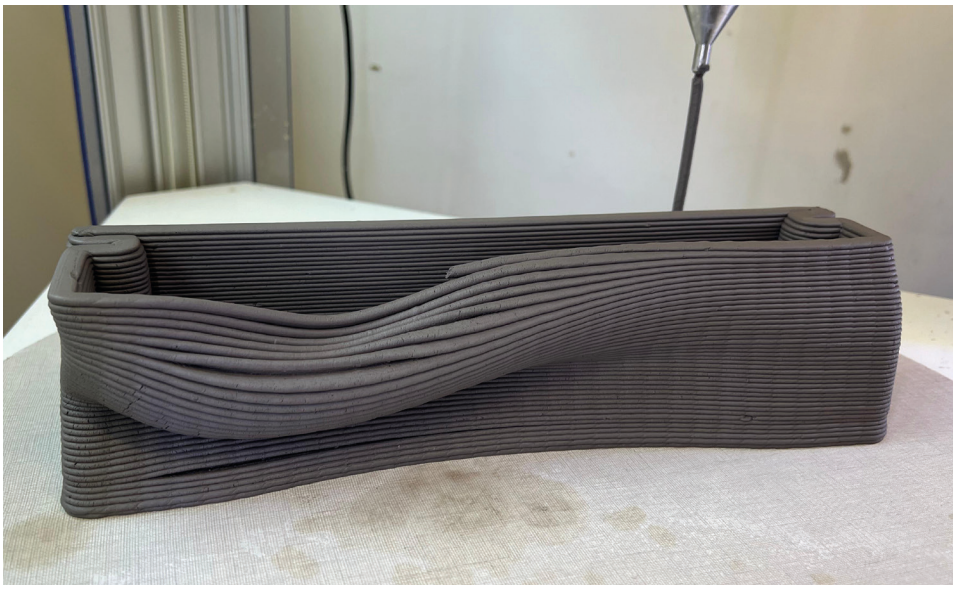


Figura 80: *Consequências do ângulo acentuado do painel A*
Fonte: *Autora*

Figura 81: *Consequências do ângulo acentuado do painel B*
Fonte: *Autora*

Devido ao ângulo acentuado da geometria do produto A (figura 80), formou-se uma deformação localizada em uma área específica da peça impressa. Essa deformação ocorre por conta da inclinação pronunciada em uma seção da peça, que faz com que o material depositado ceda levemente para baixo, desviando da camada ou do plano previsto para a impressão. Este fator pode ser atribuído ao facto que o material extrudado (ou seja, depositado) acaba ficando suspenso no ar, sem uma superfície para sustentar a impressão com precisão.

No que respeita à textura aplicada, esta poderia ser mais acentuada, exercendo assim um impacto mais pronunciado no produto. O módulo B (figura 82) demonstrou um desempenho possivelmente viável, devido à presença de um separador central entre a caixa de ar e a implementação das plantas. No entanto, foi observada alguma deformação na zona da barriga, potencialmente atribuível ao material ou ao ângulo. É de salientar

que o módulo B apresentou um peso notável, sugerindo a potencial necessidade de experimentar composições alternativas ou a redução da espessura do painel.

Devido as conclusões apresentadas, levou-se em consideração a alteração do ângulo da geometria orgânica e meter uma textura mais acentuada. O material necessita uma redução de humidade, pela redução de fluidez, tornando o material mais estável. Com essas observações da impressão do protótipo, foram feitas as alterações para o modelo final.

Apesar dos resultados desfavoráveis, o protótipo do painel B foi cozido a uma temperatura de 1050°C (óptima para a faiança branca), o que permitiu uma análise do comportamento do material. Essa análise incluiu a avaliação de eventuais anomalias, como a quebra, a descoloração ou a fragilidade, e uma observação pormenorizada da evolução da tonalidade do material. Como se pode verificar na figura 82, 83 e 84, o módulo apresenta uma descoloração percetível (manchas) e acentuou a textura que era anteriormente percetível nos testes de usabilidade.

Figura 82: *Módulo B cozido a temperatura de 1050ºC*
Fonte: *Autora*

Figura 83: *Módulo B vista superior*
Fonte: *Autora*

Figura 84: *Pormenor do módulo B*
Fonte: *Autora*

4.6. Alterações finais

Com os testes de impressão em filamento PLA, mencionados no subcapítulo 4.2.4. (aplicação das texturas nos módulos), foi selecionado o módulo (figura 85) para a melhoria da impressão na geometria e da textura aplicadas na impressora 3D com material cerâmico. O estudo começou com uma redução dos ângulos laterais, mantendo as fases paralelas. Esta abordagem foi adotada para garantir que os módulos se mantêm de forma simétrica na formação do painel. A textura foi alterada para uma mais saliente, indo mais em conta com a ideia da trans-matéria.

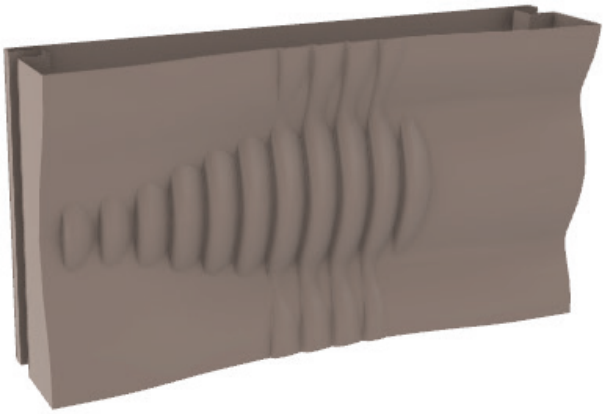


Figura 85: *Modelação Rhino da segunda versão do módulo A*
Fonte: *Autora*

4.6.1 Testes de usabilidade módulo A

Houve a alteração para amostra C3 (70% de faiança, 30% de pó de ardósia, e a soma de 30% de pó de mármore). Esta alteração proporcionou resultados favoráveis nos ensaios da capacidade de extrusão e no processo de cozedura. Esta alteração foi determinada pela ausência de resíduos de pó de tijolo, o que apresenta vantagens na diminuição de peso dos módulos depois do material estar cozido a altas temperaturas, mantendo na mesma as propriedades necessárias para o painel.

No ensaio de extrusão (figura 86 e 87), as configurações aplicadas foram

um bocal redondo de 6 mm, com altura da camada de 1,75 mm, uma velocidade de 40 mm/s e um *"flow"* de 30. Esta configuração permitiu bons resultados durante a impressão. De acordo com os parâmetros delineados na etapa 2 do estudo do material, o material apresentou resultados favoráveis no que respeita à uniformidade da extrusão do filamento. Inicialmente, demonstrou uma boa estabilidade e uniformidade de camadas durante um período de 22 minutos, sem evidenciar qualquer deformação no filamento ou nas camadas. No entanto, possivelmente devido à configuração geométrica da peça, foi observado um colapso, com uma abertura na região central.

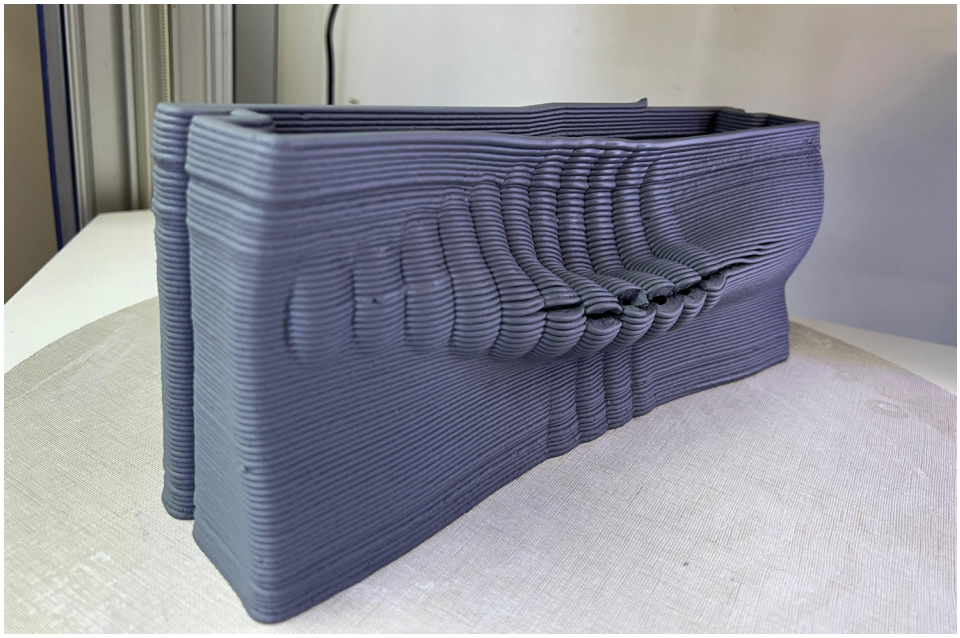


Figura 86: *Constrangimento do protótipo no módulo A*
Fonte: *Autora*

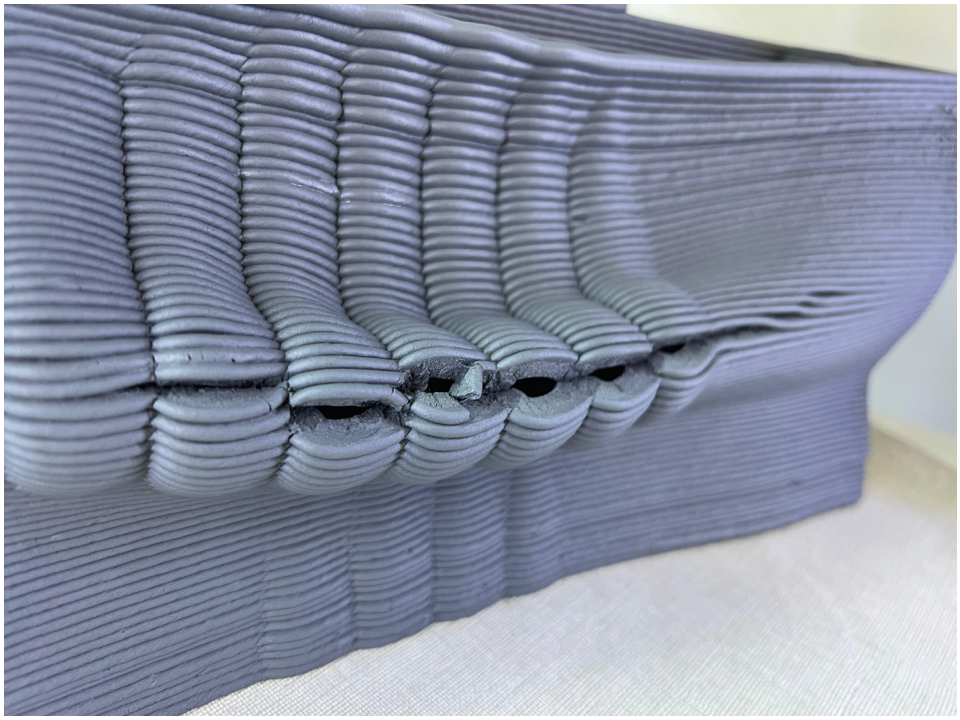


Figura 87: *Pormenor do constrangimento do protótipo no módulo A*
Fonte: *Autora*

Devido a esse constrangimento, foi efetuado uma pequena modificação nos contornos laterais e nas dimensões da peça (altura e largura), aumentando assim a sua resistência e tornando a impressão do módulo mais viável para imprimir, uma vez que não foram identificados quaisquer constrangimentos nos parâmetros da impressora e do material. O protótipo (figura 88 a 91) acabou por ser impresso em duas partes devido a um erro no código presente no G-Code (linguagem de programação para controlar o movimento da impressora 3D). Após a divisão da peça, foram impressas duas partes do mesmo módulo. Ao imprimir este módulo visa demonstrar que os parâmetros do material e os parâmetros de impressão apresentaram ótimos resultados, ilustrando assim a estabilidade e a uniformidade das camadas.

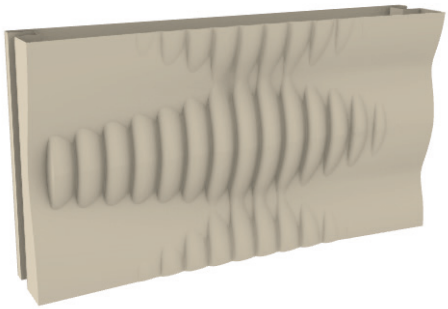


Figura 88: *Modelação do módulo A final*
Fonte: *Autora*

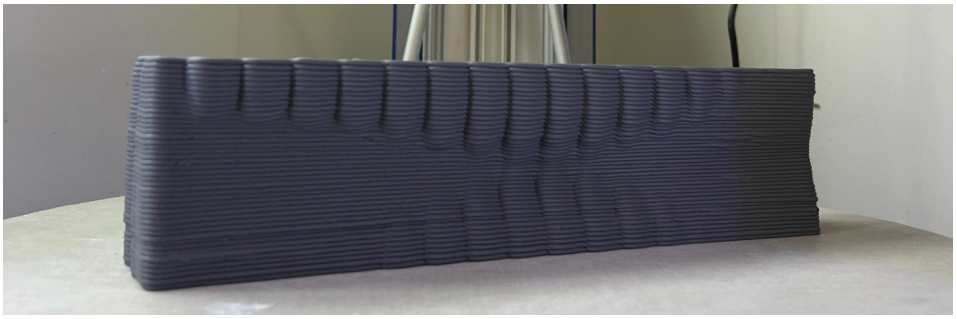


Figura 89: *Protótipo do módulo A*
Fonte: *Autora*

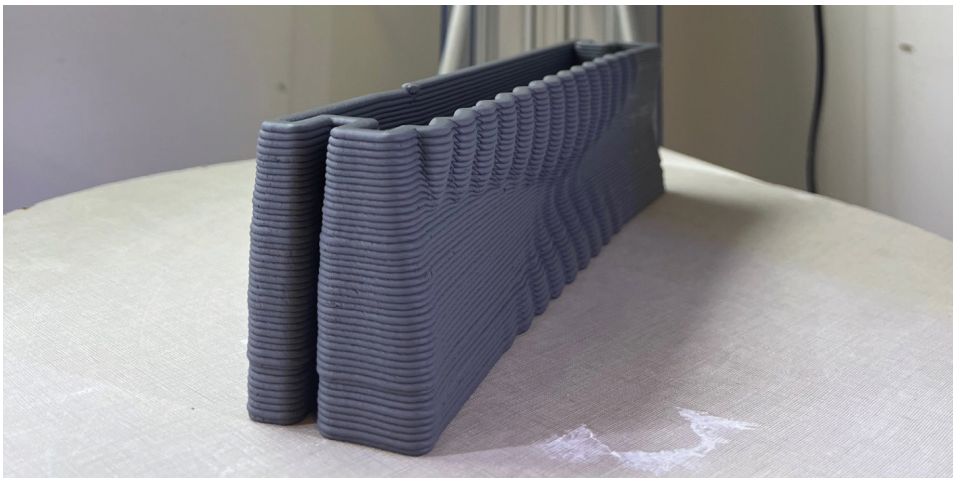


Figura 90: *Protótipo do módulo A na vista "lateral"*
Fonte: *Autora*

Figura 91: *Duas partes do módulo A*
Fonte: *Autora*

4.6.2. Processo de cozedura do módulo A

O erro do código G foi aproveitado para avaliar a exequibilidade de duas temperaturas: uma parte do módulo a 1050°C (anteriormente analisada no subcapítulo 3.1.4) e outra a 1180°C.

A temperatura de 1050ºC aplicada num dos módulos (figura 92 e 93), com base na etapa 3 do processo de comportamento térmico, já apresentava resultados esperados. Em termos de tonalidade e retração, este processo produziu os resultados esperados presentes no estudo das amostras, manifestando-se num produto com tom amarelado.

Com base nos dados de desempenho térmico, previa-se que as tonalidades dos materiais variariam significativamente em condições de calor extremo, por outro lado, nas temperaturas externas de 1180ºC seria um resultado inesperado. A decisão de incorporar esta temperatura nas amostras do anteprojeto (bienal de Valongo) teve como objetivo verificar se se verificam alterações de cor ou deformações perceptíveis, como no filamento, nas camadas ou mesmo uma possível rutura. O que se espera neste alteração de temperatura, com base no desempenho térmico, são as variações das tonalidades dos materiais sob condições extremas de calor.

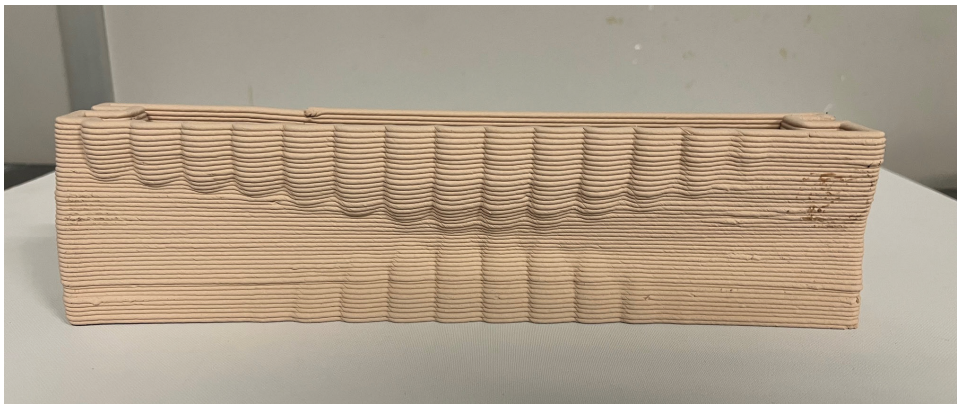


Figura 92: *Peça frontal cozida a 1050ºC*
Fonte: *Autora*

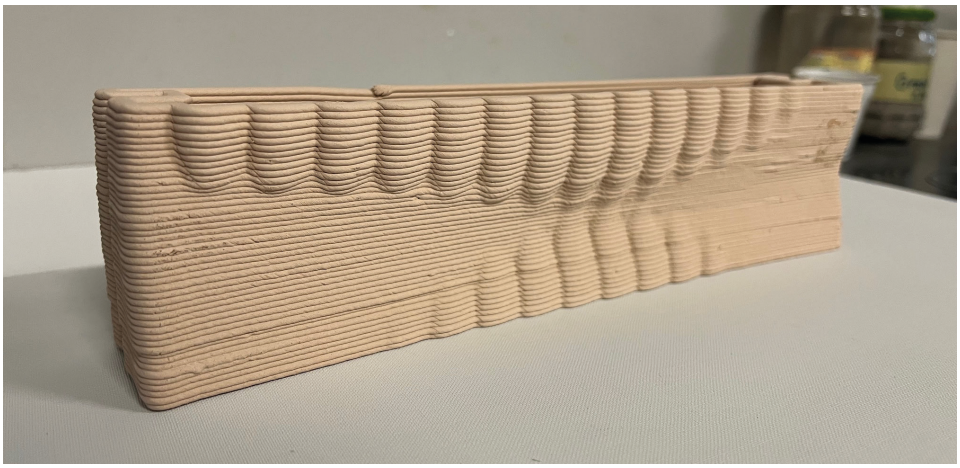


Figura 93: *Peça em perspétiva cozida a 1050ºC*
Fonte: *Autora*

Como previsto, o módulo demonstrou resultados favoráveis e exibiu a mesma percentagem de retração linear consistente observada na etapa 03 do subcapítulo 3.1.4 (O processo de comportamento térmico é apresentado).

Em contrapartida, a segunda divisão do módulo foi submetida a uma temperatura mais elevada de 1180°C, utilizando as mesmas temperaturas inicialmente propostas no anteprojeto. De forma analisar a retração, a diferença de tonalidades e possíveis deformações visíveis. Como é demonstrado na figura 94, o material sofreu uma deformação devido às temperaturas elevadas. Isto pode ser atribuído ao facto de a temperatura não ser a ideal para o material cerâmico. Além disso, a mudança de cor observada é digna de nota.

Figura 94: *Peça a uma temperatura de 1180ºC*
Fonte: *Autora*

4.7. Produto final

Dada a incompletude da peça física, foram efetuadas modelações 3D no *software "Rhinoceros 3D" e renderizado no "Keyshot", de forma a* demonstrar o projeto. O módulo proposto visa proporcionar versatilidade na utilização dos componentes, permitindo a criação de painéis interiores adaptáveis que atendem às necessidades específicas dos utilizadores. O design modular dos painéis permite a configuração de várias formas (figura 97 e 98), permitindo a cada utilizador moldar o espaço interior de acordo com as suas próprias preferências, criando assim ambientes personalizados e funcionais.

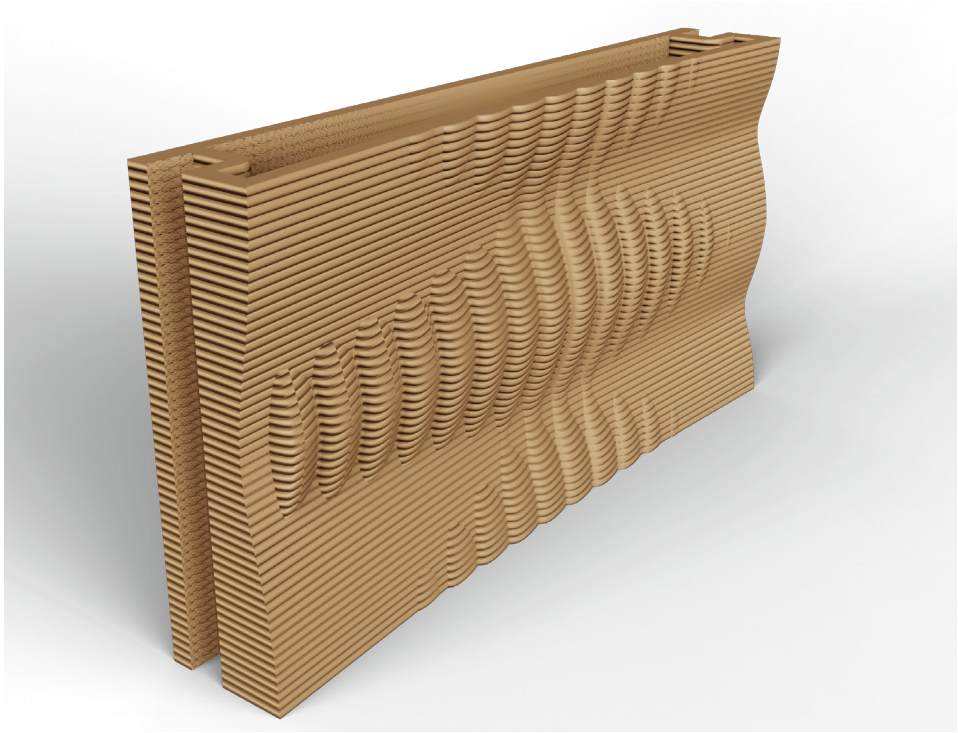


Figura 95: *Módulo A final*
Fonte: *Autora*

Figura 96: *Módulo B final*
Fonte: *Autora*

Figura 97: *Versatilidade na modulação dos módulos*
Fonte: *Autora*

Figura 98: *Fácil modulação pelo utilizador*
Fonte: *Autora*

Figura 99: *Junção do módulos com plantas*
Fonte: Autora

Figura 100: Jardim vertical
Fonte: Autora

Os módulos foram projetados para integrar espaços verdes nos ambientes internos. Isso é alcançado através de uma série de módulos que podem ser interligados, permitindo a criação de estruturas que suportam vegetação, como pequenos jardins verticais, que enriquecem o ambiente.

A montagem é simplificada através de perfis em J e suportes invisíveis (figura 101), que permitem encaixes rápidos e reconfigurações práticas. Os módulos apresentam as seguintes dimensões:

Módulo A: 295 mm (comprimento) x 150 mm (altura) x 50 mm (largura);

Módulo B: 295 mm (comprimento) x 150 mm (altura) x 100 mm (largura).

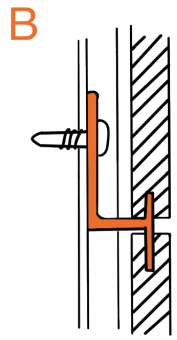


Figura 101: Desenho de suportes invisíveis
Fonte: Autora

Figura 102: *Junção dos módulos com plantas*
Fonte: Autora

Capítulo 5

Conclusão

5. Conclusão

O processo de investigação realizado – "Resíduos de ardósia na impressão 3D por extrusão" – surgiu em contexto da problemática da temática dos resíduos industriais, mais especificamente dos resíduos de ardósia. Percebendo a problemática no seio da indústria, é revelado um potencial na aplicação do reaproveitamento dos resíduos. Os estudos demonstram uma série de aplicações potenciais para materiais cimentícios na construção civil. No entanto, a falta de investigação na área da cerâmica representa uma oportunidade para explorar a utilização de resíduos em materiais cerâmicos, sendo as aplicações mais comuns em tijolos e componentes vidrados.

Como resposta ao problema, seguiu a criação de materiais provenientes de resíduos industriais aplicados à impressora 3D, cuja propriedades técnicas e visuais fossem exploradas. Neste contexto, foi realizada uma reflexão aprofundada sobre como poderia ser aplicada os resíduos em diferentes materiais. Com base nessa reflexão, surgiu a metodologia *Material Driven Design* (MDD), de forma a facilitar a promover um conhecimento profundo e detalhado de um material, obtidos através de experiências e comparações com materiais pré-existentes. Esta metodologia não só facilitou a análise de um material e a interação do utilizador no mesmo, como também ajudou a ter uma direção no desenvolvimento de uma proposta para a possível aplicação e conceito de um produto.

De seguida iniciou-se o plano experimental, com especial incidência na exploração do material através de 5 etapas:(i) compreensão e estudo do material, (ii) processo de comportamento térmico, (iii) calibração e, por fim, (iv) a impressão com aplicação do material. Este processo passou muito pela tentativa-erro, permitindo obter resultados positivos como condicionantes.

O foco no desenvolvimento do material passou pelo reaproveitamento de resíduos do pó de ardósia implementados no material cerâmico, tirando aproveito das características técnicas do material. Além disso, foi possível diminuir o impacto ambiental, reduzindo os efeitos adversos dos resíduos na economia circular.

Para o desenvolvimento do produto, com base na história presente na ardósia, buscou a morfologia das trilobites e da trans-matéria para aplicação em módulos, construindo painéis que permitissem o utilizador experienciar a criação da sua própria fachada, com uma integração de conforto visual. Através da utilização de materiais que simbolizam a mudança e a adaptação, o painel representa a passagem do tempo e a metamorfose da natureza. Com o design da peça desenvolvida, foi elaborado o protótipo, procurando uma validação do material e da geometria do produto. A necessidade de testar a usabilidade da impressora 3D não só deveu ao

material utilizado, mas também à forma geométrica do próprio produto. Nesta fase foi possível verificar a necessidade de reconstruir a geometria do produto e identificar pormenores que pudessem ser abordados nos desenvolvimentos futuros.

Nos resultados alcançados referentes ao material, verificou-se a viabilidade da incorporação dos resíduos no material cerâmico. Conclui-se que o material apresenta resultados promissores na incorporação na impressora 3D e criação de produtos. Foi possível agregar uma grande quantidade de resíduos, mas como consequência, teve a necessidade de um aumento de água. Nos protótipos com a primeira amostra selecionada, demonstrou-se uma irregularidade no filamento, na qual surgiu no teste de usabilidade do material. Devido à falta de resíduo da primeira amostra, foi possível experimentar a viabilidade de uma segunda amostra, que demostrou ser um material viável.

5.1. Constrangimentos

Apesar da sua originalidade e natureza desafiante, o projeto foi condicionado por uma série de limitações: (i) constrangimentos tendo em conta o tempo necessário para um processo mais vasto; (ii) a viabilidade da realização de uma investigação adicional sobre a textura aplicada à impressora 3D foi condicionada pelo facto de haver apenas um equipamento disponível, insuficiente para os diversos estudos que necessitam o uso simultâneo do dispositivo, o que restringiu sua utilização; (iii) a necessidade de um aumento da frequência da recolha de resíduos, devido à imitação de tempo; por último, (iv) a falta de recursos para realizar os ensaios de resistência dos materiais cerâmicos.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Levando em conta a viabilidade do estudo e os resultados positivos alcançados com o material, bem como a crescente relevância da sustentabilidade na indústria cerâmica, é essencial dar continuidade ao processo de investigação. Além disso, foi publicado um artigo/documento *"Aplicação de desperdício na impressão 3D: Potencial do pó de ardósia"*, que explora a questão dos resíduos incorporados no material cerâmico. Nesse sentido, são apresentadas várias recomendações, nomeadamente:

- Aprimorar o material, de forma a reduzir seu consumo de água, uma vez que a faiança branca utilizada já possui um teor de umidade de 20%;

- Realizar testes de resistência à ruptura e flexibilidade para avaliar a viabilidade do painel para aplicação em ambientes externos;

- Explorar mais as composições – nas proporções, materiais que possam servir de ligantes e adição de novos resíduos;

- Avaliar o ciclo de vida do material e a utilização da impressão 3D;

- Fazer mais ensaios de capacidade de construção com outras composições, que demonstraram ser viáveis para esse processo.

Já mais direcionado ao produto em si, seria pertinente:

- Viabilizar o processo de produção;

- Aprofundar o desenvolvimento da estrutura e da forma dos módulos, com o objetivo de desenvolver um produto mais resistente;

- Uma investigação mais aprofundada sobre a aplicação da textura e as potenciais aplicações de “erro” da impressão e dos métodos tradicionais em produtos com impressora 3D;

- Aplicação do módulo A por métodos tradicionais, reduzindo os custos da criação do painel e compara a eficácia das técnicas tradicionais com o método tecnológico, nomeadamente a impressão 3D.

Figura 103: Painel aplicado no interior
Fonte: Autora

Figura 104: Painel aplicado no exterior
Fonte: Autora

Referências Bibliográficas

Adams, L. (2023, October 31). 3D printing with sawdust. Woodworking Industry News. https://www.woodworkingnetwork.com/news/woodworking-industry-news/3d-printing-sawdust

Alves, B. (2021). PROCESSOS DE DOMÍNIO DE TERRENOS EM PEDREIRAS DE ROCHA ORNAMENTAL O EXEMPLO DA PEDREIRA DE ARDÓSIA MILHÁRIA S. MARTINHO DO CAMPO-VALONGO. https://hdl.handle.net/10216/137205

Amran, M., Abdelgader, H. S., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Rashid, R. S. M., & Murali, G. (2022). 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: A critical review. In Construction and Building Materials (Vol. 319). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126126

Andreola, F., Borghi, A., Pedrazzi, S., Allesina, G., Tartarini, P., Lancellotti, I., & Barbieri, L. (2019). Spent Coffee Grounds in the Production of Lightweight Clay Ceramic Aggregates in View of Urban and Agricultural Sustainable Development. Materials, 12(21), 3581. https://doi.org/10.3390/ma12213581

Ardósia x Xisto . (nd). https://rocks.comparenature.com/pt/ardosia-vs-xisto/comparison-2-19-0

Arranz, J. I., Miranda, M. T., Montero, I., & Sepúlveda, F. J. (2021). Thermal Study and Emission Characteristics of Rice Husk Using TG-MS. Materials, 14(20), 6203. https://doi.org/10.3390/ma14206203

Artes, PD (2024a). LOTUS - Massa Porcelana Imperial Extra Branca Sio-2 - Massa Cozer na Mufla - Ponto das Artes . Ponto Das Artes. https://www.pontodasartes.com/pt/catalogo/ceramica-e-materiais-de-modelagem/pastas-cozer-na-mufla/altas-temperaturas/porcelana/lotus-pasta-porcelana-imperial-extra-branca- sio-2/?srsltid=AfmBOorP3oLOELSTfIreoAFbZs0BWGPpkSEiuCt-MINqSX1FD53Xv8vK

Artes, PD (2024b). PA - Pasta Branca Baixa Temperatura Sio-2 - Pasta Cozer na Mufla - Ponto das Artes . Ponto Das Artes. https://www.pontodasartes.com/pt/catalogo/ceramica-e-materiais-de-modelagem/pastas-cozer-na-mufla/baixas-temperaturas/tradicional/pa-pasta-branca-baixa-temperatura-sio- 2/

Bak-Andersen, M. (2018). When matter leads to form: Material Driven design for sustainability. Temes de Disseny, 34, 12–33.

Barbero, S., & Cozzo, B. (2009). Trans-matéria. In Ecodesign (Tandem Verlag GmbH, p. 25).

Barbosa, M. C., & Fontes, M. S. G. de C. (2016). Jardins verticais: modelos e técnicas. PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção, 7(2), 114. https://doi.org/10.20396/parc.v7i2.8646304

Bell, M. (2013). Title: Fossil Focus: Trilobite Fossil Focus: Trilobites Introduction. In palaeontologyonline. www.palaeontologyonline.comhttp://www.palaeontologyonline.com/articles/2013/fossil-focus-trilobites/http://www.palaeontologyonline.com/site-information/copyright/. www.palaeontologyonline.comlPage1

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. Business Horizons, 55(2), 155–162. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003

Biryukova, D. (2022, April). Sustainable alternative for slate stone. Future Architecture. https://futurearchitectureplatform.org/projects/01e7f7cd-af84-4994-b652-5b870386d85a/

Blazius, C. (2019). Fachada Ventilada: Materiais e Técnicas Adotadas no Brasil e no Exterior [Instituto Federal Santa Catarina]. https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1483/TCC%20-%20Carina%20Maccari%20Blazius.pdf

Campos, M., Velasco, F., Martínez, M. A., & Torralba, J. M. (2004). Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. Journal of the European Ceramic Society, 24(5), 811–819. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00325-X

Caprichoso, C. (2019). Trilobites Calymenina do Devónico de Portugal – uma Revisão. Universidade Nova de Lisboa.

Catarino, L., Sousa, J., Martins, I. M., Vieira, M. T., & Oliveira, M. M. (2003). Ceramic products obtained from rock wastes. Journal of Materials Processing Technology, 143–144, 843–845. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00341-8

Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., Elhammouti, K., & Nasri, H. (2020). Thermal Performance and Characterization of a Sawdust-Clay Composite Material. Procedia Manufacturing, 46, 690–697. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.098

Chen, Y., Figueiredo, S., Li, Z., Chang, Z., Jansen, K., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020). Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. Cement and Concrete Research, 132. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106040

Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., & He, Y. (2019). 3D printing of ceramics: A review. In Journal of the European Ceramic Society (Vol. 39, Issue 4, pp. 661–687). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

Circular Business Models. (2021). In Ellen Macarthur Foundation. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/artigos/projetar-produtos-para-serem-usados-mais-e-por-mais-tempo?_gl=1*1ajoy5m*_up*MQ..*_ga*NDA2NjIzNDUwLjE3MjQ2OTEwNjE.*_ga_V32N675KJX*MTcyNDY5MTA2MC4xLjAuMTcyNDY5MTA2MC4wLjAuMA..

Couto, H., & Lourenço, A. (2006). Geologia no Parque Paleozóico de Valongo: Investigar, Preservar, Divulgar e Ensinar. In Atas do VII Congresso Nacional de Geologia, Évora.

CTCV. (2021, August). GRÉS PORCEL NICO. CENTRO TECNOLÓGICO DA CER MICA E DO VIDRO. https://publicacoes.riqual.org/wp-content/uploads/2021/10/TECNICA-10-julho-agosto.pdf#page=18

Cunha, J., Ribeiro, B., Panont, V., & Bolonhezi, R. H. (n.d.). ECODESIGN: APLICAÇÃO DO PALETE EM PROJETO DE DESIGN DE INTERIORES.

Dele-Afolabi, T. T., Azmah Hanim, M. A., Norkhairunnisa, M., Sobri, S., Calin, R., & Ismarrubie, Z. N. (2018). Significant effect of rice husk and sugarcane bagasse pore formers on the microstructure and mechanical properties of porous Al2O3/Ni composites. Journal of Alloys and Compounds, 743, 323–331. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.230

Diegel, O. (2014). Additive Manufacturing: An Overview. In Comprehensive Materials Processing (Vol. 10, pp. 3–18). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01000-1

Domingos, R. (2014). Contribuição para o conhecimento da fauna do Devónico do Anticlinal de Valongo (Norte de Portugal). UNIVERSIDADE DE ÉVORA .

Donaldson, K. (2023, November 29). Studio RAP uses 3D-printed tiles to create facade informed by knitwear. Dezeen. https://www.dezeen.com/2023/11/29/rap-studio-3d-printed-ceramic-tiles-facade-rippling-textile/

Drag And Drop. (2023). Buds. Drag and Drop. https://draganddrop.design/collections/collectibles/products/buds

Eberhardt, E. (2023, July 31). DART Lab creates biodegradable concrete casts using sawdust. Deezen. https://www.dezeen.com/2023/07/31/dart-lab-biodegradable-concrete-casting-sawdust/

F. Souza, L. P., & Mansur, H. S. (2004). Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. Journal of Materials Processing Technology, 145(1), 14–20. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00857-4

Fibrenamics, G. (2018, June 30). Fibrenamics Green sobre. Fibrenamics Green. http://green.fibrenamics.com/sobre

Fibrenamics Green. (2018, June 30). modelos mineral. Fibrenamics Green. https://green.fibrenamics.com/modelos-demonstradores-mineral

Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. Journal of Cleaner Production, 137, 1573–1587. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150

Fósseis. (n.d.). Museu Das Trilobites – Centro de Interpretação Geológica de Canelas – Arouca. Retrieved August 27, 2024, from https://museudastrilobites.pt/fosseis/

Gomes, P. (2015). Ardósia. Pereira Gomes - A Verdadeira Ardósia. https://www.pereiragomes.com/pt/ardosia

Gonçalves, E. (2013). Hidrogeologia das áreas de Valongo, de Paredes e de Arouca, no contexto do Anticlinal de Valongo. Universidade do Porto.

Gonçalves, P. (2018). Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação do património geológico Caso de estudo-Concelho de Valongo. Universidade do Porto.

Herpt, O. van. (2013). Explorations in Functional 3D Printed Ceramics. Oliviervanherpt. https://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics/

Herpt, O. Van. (2015). Sediment. Oliviervanherpt. https://oliviervanherpt.com/sediment/

Hopkins, M. J. (2017). Development, Trait Evolution, and the Evolution of Development in Trilobites. Integrative and Comparative Biology, 57(3), 488–498. https://doi.org/10.1093/icb/icx033

Hossain, S. S., & Roy, P. K. (2020). Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. In Journal of Asian Ceramic Societies (Vol. 8, Issue 4, pp. 984–1009). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1815348

Hu, F., Mikolajczyk, T., Pimenov, D. Y., & Gupta, M. K. (2021). Extrusion-based 3d printing of ceramic pastes: Mathematical modeling and in situ shaping retention approach. Materials, 14(5), 1–22. https://doi.org/10.3390/ma14051137

Ibrahim, N. N. (2023). Novo Delft Blue do Studio RAP. Amazing Architecture.

IMPRESORAS3D. (2021, February 5). TECLA, uma casa 3D feita com materiais naturais. IMPRESORAS3D.COM. https://www.impresoras3d.com/pt/tecla-una-casa-3d-hecha-con-materiales-naturales/

Informação-estatistica-iextractiva-24. (2022). DGEG. https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/publicacoes-estatisticas/estatisticas-da-industria-extrativa/

Informação-estatística-no-23. (2021). DGEG. https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/publicacoes-estatisticas/estatisticas-da-industria-extrativa/

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., & Zeeuw van der Laan, A. (2015). Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. International Journal of Design, 9(2), 35–54.

Khan, S. A., Jassim, M., Ilcan, H., Sahin, O., Bayer, İ. R., Sahmaran, M., & Koc, M. (2023). 3D printing of circular materials: Comparative environmental analysis of materials and construction techniques. Case Studies in Construction Materials, 18. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02059

Khan, Z., Gul, A., Shah, S. A. A., Samiullah, Q., Wahab, N., Badshah, E., Naqash, T., & Shahzada, K. (2021). Utilization of Marble Wastes in Clay Bricks: A Step towards Lightweight Energy Efficient Construction Materials. Civil Engineering Journal (Iran), 7(9), 1488–1500. https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091738

Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. In Automation in Construction (Vol. 72, pp. 347–366). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026

Leal, A. (2017). MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM RESÍDUOS COMO ADIÇÕES. http://www.fe.up.pt

Leary, M. (2020). AM production economics. In Design for Additive Manufacturing (pp. 7–31). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816721-2.00002-6

Lee, J. Bin, Maeng, W. Y., Koh, Y. H., & Kim, H. E. (2018). Porous calcium phosphate ceramic scaffolds with tailored pore orientations and mechanical properties using lithography-based ceramic 3D printing technique. Materials, 11(9). https://doi.org/10.3390/ma11091711

Leite, A., & Guedes, C. (2022). Um pouco da Geologia, História, Extração e Transformação da Ardósia. https://hdl.handle.net/10216/141561

Lino, J., Duarte, T., Neto, R., Silva, F., Bartolomeu, F., Miranda, G., Pereira, A. B., Relvas, C., Santana, L., & Terroso, M. (2023). Impressão 3D – Tecnologias, materiais e aplicações (L. Publindustria - Produção e Comunicação, Ed.).

Llorach, P. (2020). Circular Design and Circular Material Design. In V. Clèries, S. Rognioli, P. Solanki, & P. Llorach (Eds.), Material Designers: Boosting talent towards circular economies (pp. 14–17). Elisava, Politecnico di Milano, Matter.

LOTUS - Pasta Porcelana Imperial Extra Branca Sio-2. (2024). Ponto Das Artes. https://www.pontodasartes.com/pt/catalogo/ceramica-e-materiais-de-modelagem/pastas-cozer-na-mufla/altas-temperaturas/porcelana/lotus-pasta-porcelana-imperial-extra-branca-sio-2/

Lyu, F., Zhao, D., Hou, X., Sun, L., & Zhang, Q. (2021). Overview of the development of 3D-printing concrete: A review. In Applied Sciences (Switzerland) (Vol. 11, Issue 21). MDPI. https://doi.org/10.3390/app11219822

M. C. de A. Oliveira. (n.d.). ardósia como matéria-prima para cerâmica.

Macarthur, E. (2021). CIRCULAR BUSINESS MODELS.

Maia, J., Ramos, N., Veloso, R. C., Ventura, J., Pereira, P., Corvacho, H., Lopes, M. de L., & Cristelo, N. (2022). O potencial dos resíduos industriais no desenvolvimento de novas argamassas para aplicação em fachadas. https://hdl.handle.net/10216/147882

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 863–871. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203

Mansur, A. A. P., Peres, A. E. C., Palhares, L., & Mansur, H. S. (2006). Study of pore size distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders. Minerals Engineering, 19(5), 525–527. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.10.001

Material District. (2019, June 11). Remake ceramics. Material District. https://materialdistrict.com/material/remake-ceramics/

Materiality In Design. (2024). Studys Marter. https://www.studysmarter.co.uk/explanations/architecture/architectural-design-principles/materiality-in-design/

McGuickin, G. (2023, December 11). Pormenores: A fachada de cerâmica impressa em 3D da Ceramic House em Amesterdão. Archello. https://archello.com/pt/news/pormenores-a-fachada-de-ceramica-impressa-em-3d-da-ceramic-house-em-amesterdao

McKnight; Jenna. (2018, April 12). 3D-printed tiles filled with succulents form cabin by Emerging Objects. Dezeen. https://www.dezeen.com/2018/04/12/emerging-objects-3d-printed-backyard-cabin-tiles-succulents-oakland-california/

Monteiro, R. (2018). Dos restos em pó da ardósia criou-se um novo material sustentável. Público. https://www.publico.pt/2018/04/16/p3/noticia/dos-restos-em-po-da-ardosia-criouse-um-novo-material-sustentavel-1833320

Montero, M., Jordan, M., Almendrocandel, M., Sanfeliu, T., & Hernandezcrespo, M. (2009). The use of a calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing of ceramic tile bodies. Applied Clay Science, 43(2), 186–189. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.08.003

Moreira, J. M. S., Manhães, J. P. V. T., & Holanda, J. N. F. (2008). Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. Journal of Materials Processing Technology, 196(1–3), 88–93. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.008

Município de Valongo. (2017, June 9). No Rasto das Trilobites. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=MWR6Mdp1RrU

Muñoz, L. S., Cruciol Barbosa, M., Fontes, M. S. G. de C., & Faria, J. R. G. de. (2019). Desempenho térmico de jardins verticais de tipologia fachada verde. PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção, 10, e019013. https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652775

Nair Sarangi. (2023, March 17). Alterfact's Elaboration series explores the intersection of 3D printing and ceramic art. Parametric Architecture. https://parametric-architecture.com/alterfacts-elaboration-series-explores-the-intersection-of-3d-printing-and-ceramic-art/

Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). In 3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications (pp. 333–347). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6

Nieves, R., Ustarez, V., & Serena, J. (2020). Reprint Ceramics. Coudre Studio. https://coudre.studio/projects/reprint-ceramics/

Oliveira, L. S. (2023). A impressão 3D e a sustentabilidade. Industria 40 - Manufatura Avançada. https://www.industria40.ind.br/artigo/24564-a-impressao-3d-sustentabilidade

Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Snelson, D. G., & Bai, J. (2010). Applications of slate waste material in the UK. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management, 163(1), 9–15. https://doi.org/10.1680/warm.2010.163.1.9

Owen, D., Hickey, J., Cusson, A., Ayeni, O. I., Rhoades, J., Deng, Y., Zhang, Y., Wu, L., Park, H. Y., Hawaldar, N., Raikar, P. P., Jung, Y. G., & Zhang, J. (2018). 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. Progress in Additive Manufacturing, 3(1–2), 3–9. https://doi.org/10.1007/s40964-018-0037-3

PA - Pasta Branca Baixa Temperatura Sio-2. (2024). Ponto Das Artes . https://www.pontodasartes.com/pt/catalogo/ceramica-e-materiais-de-modelagem/pastas-cozer-na-mufla/baixas-temperaturas/tradicional/pa-pasta-branca-baixa-temperatura-sio-2/

Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. Ceramics International, 44(9), 10258–10265. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031

Peixoto, R., Dutra, S., Alighiery, P., De Araújo, S., Meire, R., Revoredo De Macedo, P., Maribondo Do Nascimento, R., Gomes, U., Martinelli, A. E., & Paskocimas, C. A. (n.d.). Desenvolvimento de Formulações de Massas para a Indústria de Cerâmica Vermelha do Rio Grande do Norte. In Cerâmica Industrial (Vol. 11, Issue 3).

Pereira, F. R. (2006). Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas.

Pinto, F. (2018, March 28). Empresa de Valongo vai reaproveitar resíduos de lousa para fazer produto inovador. Verdadeiro Olhar. https://www.verdadeiroolhar.pt/empresa-valongo-vai-reaproveitar-residuos-lousa-produto-inovador/

Pintos, P. (2021, May 3). Casa Impressa em 3D com Tecnologia TECLA / Mario Cucinella Architects. ArchDaily. https://www.archdaily.com.br/br/960943/casa-impressa-em-3d-com-tecnologia-tecla-mario-cucinella-architects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

Portas, C. (2018, February 13). Fabrico Nacional. RTP Play. https://www.rtp.pt/play/p3511/e330877/fabrico-nacional

Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2017). ScienceDirect Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing-An Overview. www.sciencedirect.com

Rael, R., Fratello, V. S., Wilson, K., & Schofield, A. (2016). Seed Stitch. Emerging Objects.

Rane, K., Farid, M. A., Hassan, W., & Strano, M. (2021). Effect of printing parameters on mechanical properties of extrusion-based additively manufactured ceramic parts. Ceramics International, 47(9), 12189–12198. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.066

Ranjit, J. (2021, August 4). 3D Printed Concrete Book Cabin Exposed by Professor Xu Weiguo's Team. Parametric Architecture. https://parametric-architecture.com/3d-printed-concrete-book-cabin-

exposed-by-professor-xu-weiguos-team/?__cf_chl_

Sobral, I. (2020). Caraterização física e química de lamas resultantes do beneficiamento de pedra natural para o fabrico de misturas betuminosas. http://hdl.handle.net/10400.22/16819

tk=za3VMBX3trauZbM2VPO345zSTDH5f6FdU5LGlhdquII-1709657452-0.0.1.1-1706

Ravenscroft, T. (2023, June 23). New Delft Blue archways wrapped in 3,000 unique 3D-printed ceramics tiles. Dezeen. https://www.dezeen.com/2023/06/29/new-delft-blue-3d-printed-ceramic-archway-studio-rap/

Reis, R. (2021). Fabrico Aditivo.

Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Caicedo, M. A., & Delvasto Arjona, S. (2023). 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. In Automation in Construction (Vol. 146). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693

Rocha, P. (2018). S. Martinho do Campo: a Mina e a Banda. Notas sobre um percurso identitário. https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/14491

Rochas Ornamentais e Industriais Portuguesas. (2022). https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/artigos-e-outras-publicacoes/artigos-e-outros/

Santos, T. (2021). A INFLUÊNCIA DO JARDIM VERTICAL NO MEIO URBANO. FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE TEÓFILO OTONI.

Sastre, C. (2020). How Materials can Shape our Future. In L. Clèries, V. Rognioli, S. Solanki, & P. Llorach (Eds.), Material Designers: Boosting talent towards circular economies (pp. 12–13). Elisava, Politecnico di Milano, Matter.

Say, A. (2019, June 29). 3D Printed Earth Wall with Embedded Staircase. Parametric Architecture.

Sena da Fonseca, B., Vilão, A., Galhano, C., & Simão, J. A. R. (2014). Reusing coffee waste in manufacture of ceramics for construction. Advances in Applied Ceramics, 113(3), 159–166. https://doi.org/10.1179/1743676113Y.0000000131

Senda, S. (2015, October 19). olivier van herpt's 3D printed ceramics at design academy eindhoven. Designboom. https://www.designboom.com/design/olivier-van-herpt-3d-printed-ceramics-design-academy-eindhoven-eat-shit-milan-design-week-04-28-2015/

Silva, B. (2015). COMPORTAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS VENTILADAS [Universidade do Porto]. http://www.fe.up.pt

Sobral, I. J. (2020a). Caraterização física e química de lamas resultantes do beneficiamento de pedra natural para o fabrico de misturas betuminosas. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Sobral, I. J. (2020b). Caraterização física e química de lamas resultantes do beneficiamento de pedra natural para o fabrico de misturas betuminosas [Instituto Superior de Engenharia do Porto]. https://www.proquest.com/openview/7e03945b60b421fc248b8fff084522af/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

Sousa, M. (2022, October 2). Casa é impressa com terra, babosa e clara de ovo em sete semanas. Archdaily. https://www.archdaily.com.br/br/988824/casa-e-impressa-com-terra-babosa-e-clara-de-ovo-em-sete-semanas

Souza, A. J., Pinheiro, B. C. A., & Holanda, J. N. F. (2010). Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. Journal of Materials Processing Technology, 210(14), 1898–1904. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.001

Souza, L. P. D. F., & Mansur, H. S. (2004). Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. Journal of Materials Processing Technology, 145(1), 14–20. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00857-4

Story, B. (n.d.). Empresa das Lousas de Valongo dá nova vida à ardósia. Jornal Noticias. Retrieved April 8, 2024, from https://www.jn.pt/local/especial-patrocinado/empresa-de-lousas-de-valongo-da-

nova-vida-a-ardosia-9331575.html/

Teixeira, J., Rangel, B., Lino, J., Neto, R., & Nunes, S. (2018, November 23). Impressão 3D com Extrusão de Material Cimentício. Repositório Aberto Da Universidade Do Porto . https://hdl.handle.net/10216/133808

Teixeira, J., Schaefer, C. O., Rangel, B., Maia, L., & Alves, J. L. (2023). A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art. In Frontiers of Architectural Research (Vol. 12, Issue 2, pp. 337–360). KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.10.001

Tempelman, E., Shercliff, H., & Ninaber van Eyben, B. (2014). CHAPTER 11_ Manufacturing and Design Understanding the principles of how things are made.

Torres, P., Fernandes, H. R., Olhero, S., & Ferreira, J. M. F. (2009). Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. Journal of the European Ceramic Society, 29(1), 23–30. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.045

Touogam Touolak, B., & Tchangnwa Nya, F. (2014). More Value of Maroua Clay in the Formulation of Ceramic Products (Terracotta, Earthenware, Stoneware, Porcelain). Advances in Materials Physics and Chemistry, 04(12). https://www.scirp.org/html/5-1510327_52515.htm#txtF3

Valongo, cm. (2023, July 11). Ardósia. Câmara Municipal de Valongo. https://www.cm-valongo.pt/descobrir/marcas-de-valongo/ardosia

Valongo, C. M. (2016, December 19). Museu da Lousa. Cm-Valongo. https://www.cm-valongo.pt/pages/503?poi_id=10

Valongo, M. (2018, March 5). A Pedra Negra de Valongo - Uma História Desconhecida. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=NAWUQPcTphQ

Vilarinho, I. S., Filippi, E., & Seabra, M. P. (2022). Development of eco-ceramic wall tiles with bio-CaCO3 from eggshells waste. Open Ceramics, 9, 100220. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100220

Warnier, C., & Verbruggen, D. (2018, June 18). Brick Clay Carafe & Cups. UNFOLD. http://unfold.be/pages/bokrijk-ware.html

Wienerberger. (2024). Steenfabriek Maaseik: 24 karaats gevelstenen. Wienerberger Worldwide. https://www.wienerberger.be/architectuur/updates/steenfabriek-maaseik--24-karaats-gevelstenen.html

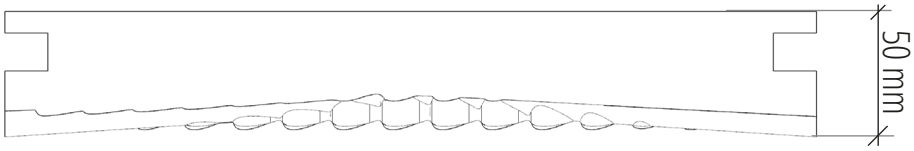
Yamamoto, N., Singh, J., & Dai, J. (2018, November 7). Multi-functional Nano-porous Ceramics1958. American Society for Composites 2018. https://doi.org/10.12783/asc33/26063

Zhuang, J. (2015). Olivier van Herpt. Oliviervanherpt. https://oliviervanherpt.com/about/

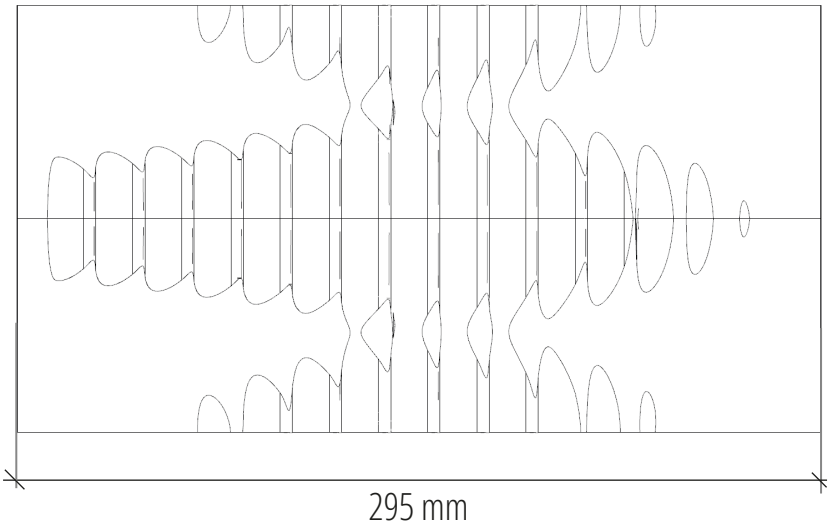
Anexos

Módulo A

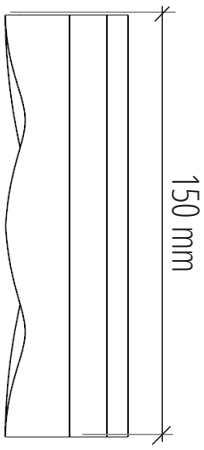
V. superior



V. Frontal

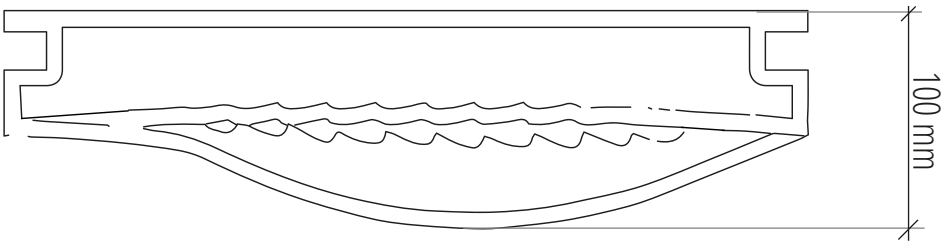


V. Direira

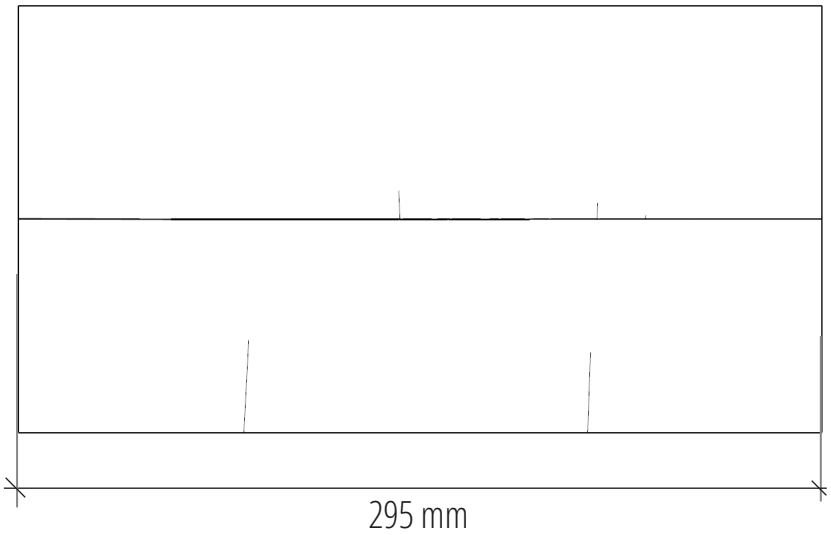


Módulo B

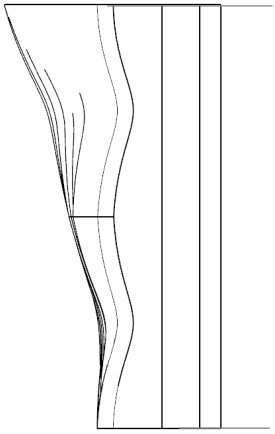
V. Superior



V. Frontal



V. Direira



Anexos

Aplicação de desperdício na impressão 3D: Potencial do pó de Ardósia

Vera Gomes [1*], Jorge Lino Alves [2], Bárbara Rangel [3,4], João Teixeira [3], Manuel Jesus [3] e Pedro Aguiar [5]

[1] MDIP, Mestrado em Design Industrial e de Produto, Faculdade de Belas-Artes (FBAUP) e Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Porto, Portugal
[2] Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia (FEUP), INEGI, Universidade do Porto, Porto, Portugal
[3] CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Porto, Portugal
[4] CEAU, Centro de Estudos de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura (FAUP), Universidade do Porto, Porto, Portugal
[5] Técnico Superior da Oficina de Cerâmica, Faculdade de Belas-Artes (FBAUP), Universidade do Porto, Porto, Portugal

*vera.ines.gomes@hotmail.com

Resumo: O processo de extração, corte e polimento da ardósia leva ao desperdício do recurso natural, através da produção de uma grande quantidade de resíduos em forma de pó fino. Esta pesquisa explora essa temática, procurando introduzir este material num modelo de produção circular. No presente artigo, o objetivo principal é reutilizar resíduos da indústria de ardósia, mais especificamente os desperdícios no seio industrial da empresa de Lousas de Valongo. Este trabalho tem como objetivo elaborar uma investigação experimental sobre o impacto dos desperdícios gerados, e assim criar um material para uma produção mais sustentável utilizando a tecnologia de Impressão 3D. A fim de atingir os objetivos propostos, foram realizados ensaios de forma a avaliar o pó de ardósia e o seu potencial na criação de um material para Impressão 3D. Os resultados deste estudo inicial revelam que o pó de ardósia é um material que permite diversificar a paleta de opções estéticas. Os resultados permitem concluir que os resíduos de ardósia podem ser reaproveitados na criação de um novo material, de base cerâmica, com potencial para a Impressão 3D.

Palavras-chaves: Ardósia; Cerâmica; Desperdício; Impressão 3D; Material.

1. INTRODUÇÃO

A ardósia é uma rocha metamórfica que, em dependência das condições geotécnicas pode estar localizada a uma profundidade específica, para tal surge a necessidade de extrair grandes volumes de material sem valor comercial (De Engenharia, 2021a). A extração leva ao desperdício deste recurso natural e de outros por consequência, uma vez que, nem todos os resíduos são utilizados de forma eficiente. O desperdício pode ser resultado da estrutura da rocha, fraturas no momento da foliação e leitos de ardósia, sendo considerados resíduos inertes e recicláveis (Silva, 2015). Esses resíduos também acabam por ser acumulados nos reservatórios e cursos d'água (2015).

Além dos problemas ambientais, estudos revelam que na indústria de ardósia:

> "...concentrações de pó de sílica livre eram muito elevadas. O inquérito médico, envolvendo 593 trabalhadores, revelou que a prevalência de silicose

1

nesta indústria era de 54,6%. Destes, 17,7% dos trabalhadores apresentavam silicose conglomerada" (Saiyed et al., 1985).

Conclui-se que as indústrias estão associadas a riscos de alterações respiratórias, devido ao aumento de risco de silicose (Rego et al., 2001), acabando por destacar a importância da reutilização desses desperdícios e dar uma nova utilidade ao pó de ardósia.

O principal objetivo deste estudo é reutilizar os desperdícios do pó de ardósia (lousa) no seio industrial da empresa das Lousas de Valongo. Pretende-se oferecer uma segunda vida ao material, implementando o conceito de economia circular. Essa colaboração tem como fim elaborar uma investigação e experimentação sobre a implementação dos desperdícios gerados pela empresa. Assim, tenciona-se desenvolver um novo material associado a uma tecnologia com potencial sustentável, a Impressão 3D (I3D).

A metodologia do projeto consiste na realização de um plano experimental baseado na conceção de misturas com um material base (Pó de ardósia) e vários desperdícios, permitindo assim avaliar o pó de ardósia e o seu potencial na criação de um material para I3D.

2. METODOLOGIA

A presente investigação foca-se em possíveis aplicações de desperdícios de pó de ardósia, tendo como resultado um material com potencial para I3D, com recurso a uma metodologia de caráter experimental.

Inicialmente, investigou-se as caraterísticas e propriedade do pó de ardósia, bem como a sua compatibilidade com outros materiais como: cerâmica, pó de tijolo, areia, café e monocol V. Considerando o potencial da compatibilidade dos materiais, como a Faiança (cerâmica) e o pó da ardósia, foram efetuados vários estudos experimentais, de forma a cumprir os critérios de avaliação. Os critérios de avaliação incluíram: mistura homogénea, uniformidade do filamento extrudido e adesão entre camadas durante a impressão.

Tendo em conta a fragilidade da matéria em verde, realizou-se o processo de cozedura, designada de "chacota" (Canotilho, 2003). Este processo permite melhorar a rigidez das amostras, enquanto possibilita uma análise das diferenças do material antes e depois da cozedura. Nesta análise, destacam-se as variações de cor e a retração nas amostras.

Após encontrado um material que respondesse aos critérios de avaliação, foi realizado um estudo de impressão, tendo como base um modelo pré-definido. Isto permitiu visualizar o comportamento do material na impressão ao avaliar a qualidade do filamento extrudido.

Por fim, testou-se a aplicabilidade, procedendo-se ao desenvolvimento de um moodboard e de um protótipo. O moodboard tem como finalidade fornecer uma referência visual do pensamento do estudo experimental, consolidando uma compreensão clara da ideia do pensamento e as conclusões obtidas.

3. MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Para o estudo experimental foram utilizados os seguintes materiais: pó de Ardósia (EN 12440), faiança branca (Sio-2), pó de tijolo, resina acrílica (monocol V) e desperdício de café (borra de café).

Os desperdícios de ardósia são reaproveitamentos obtidos na Empresa das Lousas de Valongo. Possuem características distintas, pela sua:

"... cor cinzenta-azulada, homogénea, compacta e finamente granular, integra as suas qualidades naturais de beleza, resistência e cor inalterável que, além

de permitir a sua extração até aos dias de hoje, usufrui de aplicações, desde o começo, tanto no setor da construção civil como na decoração." (De Engenharia, 2021b, p.32).

Os materiais presentes na tabela 1 foram analisadas segundo as seguintes categorias: componentes secos (pó de ardósia, pó de tijolo e borra de café), ligantes (argila, monocol V) e água.

Tabela 1. Mistura das argamassas desenvolvidas (%).

	PA	C	A	M	PT	BC
A – 5	62	26	12	-	-	-
A – 6	19	72	9	-	-	-
A – 7	19	71	9	1	-	-
A – 8	72	18	9	1	-	-
A – 9	26	52	12	-	10	-
A – 9´1	25	50	15	-	10	-
A – 10	26	47	12	-	15	-
A – 11	25	40	12	-	23	-
A – 12	26	52	12	-	-	10
A – 12´1	26	51	12	1	-	10
A – 13	32	43	9	-	-	16
A – 14	23	45	9	-	-	23

PA – Pó de Ardósia; A – Água; C – Cerâmica; PT – Pó de Tijolo; M – Monocol V; BC – Borra de Café.

Todas as misturas desenvolvidas apresentam uma percentagem de pó de ardósia, água e cerâmica. Com efeito, para perceber a influência do desperdício em cada material para I3D, o projeto decorreu nos seguintes moldes: a relação água/pó (w/p) foi obtida através da realização de vários ensaios de mistura, partindo de um acréscimo gradual de água e aumentando, assim, a dosagem, até se obter uma consistência que permita a impressão. A composição com maior dosagem de pó de ardósia atingiu os 72% da massa total da composição. No entanto, para melhorar as suas propriedades para impressão, foi necessário diminuir a quantidade utilizada nas restantes composições.

Nas amostras A-5 e A-6 foi feito um estudo inicial entre o comportamento do pó de ardósia, cerâmica e água e assim analisar a percentagem média de água necessária. Nas composições A7 e A8 foi implementado o monocol V, com o intuito de melhorar a capacidade de extrusão. A partir das amostras base, foi utilizado o pó e grão de tijolo nas amostras A-9 até A-11. A implementação de borra de café nas amostras finais (A-12, A-12´1, A-13 e A-14), permitiu a redução na percentagem de água, devido a humidade presente no desperdício de café.

4. MÉTODOS

Todas as amostras desenvolvidas devem ser testadas de acordo com o procedimento apresentado na Figura 1. Inicialmente, as composições misturadas foram realizadas através de uma extrusora manual, permitindo avaliar a sua homogeneidade, capacidade de extrusão e adesão entre camadas durante a impressão. No futuro, serão testadas na impressora, para avaliar sobre a sua viabilidade ou necessidade de reformular a composição.

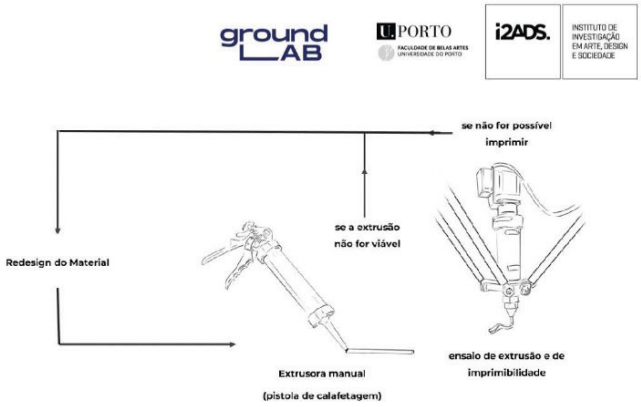


Figura 1. Método para testar validação dos materiais desenvolvidos (fonte própria, 2023).

Após a mistura, foi efetuada a metodologia representada na Figura 1, permitindo avaliar as amostras (figura 2) e determinar as dosagens adequadas de cada constituinte. A extrusora manual (pistola de calafetagem) é uma ferramenta que possibilita replicar a extrusão do processo de I3D, permitindo previamente, identificar se o material desenvolvido apresenta a fluidez necessária para impressão. Os materiais que demonstraram não ser viáveis durante impressão manual, foram redesenhados e passados de novo para a extrusora manual. Os resultados que demonstraram ser positivos, foi realizado um modelo pré-definido, que permitiu visualizar o comportamento do material na impressora *Delta WASP 40100*.

Figura 2. Composições em estado "verde" (fonte própria, 2023).

Figura 3. Composições em estado "verde" 2 (fonte própria, 2023).

Já numa fase posterior do estudo do material, baseado nos critérios de avaliação, foi realizado um processo de cozedura das amostras. Conseguindo uma análise das diferenças do material antes e depois da cozedura presentes na figura 3 e 4.

> "No primeiro caso, a alteração física manifesta-se através de uma aglomeração de partículas que estão em contacto, diminuindo a sua superfície e porosidade do agregado. Em termos empíricos, designa-se este processo físico de contração (Canotilho, 2003, p.24).

As alterações físicas e químicas nas amostras derivaram da ação do calor sobre os corpos cerâmicos, durante a primeira cozedura "chacota". Este processo necessita de controlo do tempo e das várias temperaturas, em relação à composição da matéria. A cerâmica de faiança branca (Sio-2) é um material de temperaturas baixas (1050-1080ºC). No entanto, para alcançar uma comparação mais acentuada, foi aplicada uma temperatura mais elevada. O processo iniciou com 70ºC/h e aumentou, gradualmente, para 600ºC/h, de modo a retirar o excesso de humidade da peça (com aberturas no forno). Quando o forno atingiu a temperatura máxima, a água absorvida foi eliminada através dos poros da superficie da argila. Por fim, a temperatura foi elevada de 170ºC/h até 1180ºC, mantendo constante esta temperatura durante um período de 5min, antes de arrefecer em condições naturais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de cozedura (figura 4), as amostras (pó de ardósia, faiança, monocol V e água) sofreram uma grande variação de cor, do estado verde para o estado final da "chacota". As amostras com monocol V (A-7 e A-8) apresentam tonalidades mais claras do que amostras A-6 e A-5. A introdução de monocol V (resina acrílica) permitiu facilitar a manipulação da matéria e originar uma mudança de cor mais drástica.

Já, em referência às amostras com a implementação de pó de tijolo com uma percentagem que deriva de 10%,15% e 23%, o que não demonstra uma grande diferença entre elas (A-9, A-9´1, A-10 e A-11) no estado final de "chacota", mantendo uma cor marrom escuro-chocolate. Houve uma necessidade de sair da quantidade de percentagem base de água, com um acrescente de mais 10 ml. Em questão de critério, a amostra que demonstra maior viabilidade de impressão é A-11, devido a uma textura suave, a sua aderência, estabilidade e fluxo. As amostras (A-12, A-12´1, A-13 e A-14) com a implementação de desperdício de borra de café, permitiram diminuir a quantidade de água, pela humidade presente no mesmo. As variações de percentagem também derivaram de 10%, 16% e 23%, mas apresentam uma cor rosa-claro, sendo o mais aproximado da ardósia em estado "chacota".

Figura 4. Moodboard do plano experimental (fonte própria, 2023).

A partir destas composições é possível destacar a composição inicial (A-5) com ligante, uma amostra com 62% de PA, que permitiu a utilização de maior quantidade de desperdício. Em consequência, pelo volume de matéria presente, houve uma necessidade de acrescentar mais água. A matéria já cozida apresenta uma cor aproximada a marrom escuro, com a sensação de estar "vidrada". A composição A-11 apresenta 30% de desperdício de ardósia e uma implementação de 23% de pó de tijolo. É uma amostra que demonstrou ter uma textura suave, boa aderência, estabilidade e um bom fluxo de impressão, durante o estudo de impressão com base o modelo pré-definido. Apresenta uma tonalidade parecida com a amostra A-5 (marrom-escuro), com menos brilho. Esta tonalidade pode ser resultado da implementação do pó de tijolo.

A I3D do modelo pré-definido (figura 5) permitiu visualizar o comportamento do material (A-11). Inicialmente, a extrusão foi efetuada com um bocal de 6mm, mas devido à falta do controlo em relação à velocidade de impressão e à quantidade da saída do fluxo de material, houve a necessidade de otimizar o controlo do filamento. Para tal, no decorrer da impressão, o bocal foi substituído por um de 4mm. Essa mudança permitiu um maior controlo do filamento e a diminuição da quantidade de fluxo do material. Este processo de I3D, permitiu avaliar o uso do material para criações futuras de Modelos 3D. Também é de notar, a influência da mudança de cor, à medida que o material permanece no estado "verde".

Figura 5. Modelo pré-definido de amostra A-11 em estado "verde" (fonte própria, 2023).

6. CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou uma visão sobre os desperdícios que são gerados (pó de ardósia, lama e pedaços de ardósia), pela empresa de Lousa de Valongo, ressaltando a importância de minimizar o desperdício relacionado à extração e à preparação de rochas e, promovendo a reflexão sobre a criação de novos materiais que privilegiam um consumo circular. Neste contexto, foi fundamental abordar as causas de desperdício e implementar uma estratégia eficaz, que promovesse a economia circular e demonstrasse o potencial do reaproveitamento da ardósia. De modo a promover um enfoque mais responsável dos recursos naturais.

Com efeito, o estudo teve o objetivo de explorar a predominância do desperdício gerado (pó de ardósia) e, assim, desenvolver um novo material implementado na I3D. De facto, o processo de classificação, baseado nos métodos de validação dos materiais e, a análise do resultado dos processos de cozedura, ocuparam um papel determinante na redução de desperdícios do setor industrial. O estudo experimental assenta na implementação de desperdícios (o pó de ardósia, a cerâmica e outros agregados), para a criação de novos materiais sustentáveis. Resultados estes que, permitiram uma grande quantidade de uso de desperdício (A-5 e A-11) e, apresentaram resultados promissores para uso na tecnologia de I3D: mistura homogénea, uniformidade do filamento extrudido e adesão entre camadas durante a impressão.

Apesar dos resultados promissores, serão necessários ensaios mais detalhados que validem a utilização do pó de ardósia num material para I3D. Trabalhos futuros podem incluir a implementação de novos materiais na cerâmica e um estudo direcionado para a implementação de ardósia no cimento. Além disso, implementar novas metodologia que possam vir a ser benéficas. E assim, criar novos materiais que reaproveitassem uma boa quantidade de resíduos, promovendo uma economia circular.

REFERÊNCIAS:

Canotilho, M. H. P. C. (2003). Processos de cozedura em cerâmica. https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/203

De Engenharia, F. (2021, October 19). Processos de domínio de terrenos em Pedreiras de rocha ornamental - O exemplo da pedreira de ardósia milhária S. Martinho do campo - valongo. https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/137205

De Engenharia, F. (2022, April 1). Louseiras de Valongo - Um pouco da Geologia, História, Extração e Transformação da Ardósia. https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/141561

Museu da Lousa. (n.d.). CM Valongo. https://www.cm-valongo.pt/pages/503?poi_id=10

Rego, G., Martínez, C., Quero, A., Blanco, T. P., & Borquea, J. M. (2001). Efectos del polvo inhalado en los trabajadores de la industria de pizarras. Medicina Clínica, 116(8), 290–291. https://doi.org/10.1016/s0025-7753(01)71802-7

Rosa, M. P., Borges, M. A., Nascimento, L. G. D., Dias, S. C., Da Guia Costa, E. M., Cajueiro, M. R. C., Meneses, P. E. O., & De Castro Lopes, S. J. (2020). VIABILIDADE NA REUTILIZAÇÃO DA ARDÓSIA EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO NA DOSAGEM DO CONCRETO. In Brazilian Journals Editora eBooks (pp. 287–297). https://doi.org/10.35587/brj.ed.0000168

Saiyed, H. N., Parikh, D. J., Ghodasara, N., Sharma, Y. K., Patel, G., Chatterjee, S. K., & Chatterjee, B. B. (1985). Silicosis in slate pencil workers: I. An environmental and medical study. American Journal of Industrial Medicine, 8(2), 127–133. https://doi.org/10.1002/ajim.4700080207

Santos, R., Camargo, V. a. F., & De Souza Rodrigues, C. (2016). APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE ARDÓSIA EM SOLO MELHORADO COM CIMENTO. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/339784146_APLICACAO_DO_RESIDUO_DE_ARDOSIA_EM_SOLO_MELHORADO_COM_CIMENTO

Silva, R. (2015). PROPOSTAS DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE ARDÓSIA DA CIDADE DE POMPÉU, MINAS GERAIS - PDF Free download. (n.d.). https://docplayer.com.br/33188502-Propostas-de-aproveitamento-de-residuos-de-ardosia-da-cidade-de-pompeu-minas-gerais.html