

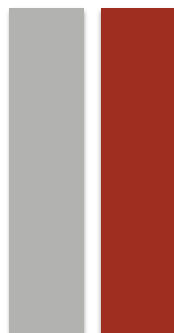
MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO

# **Impressão 3D com cimento e pó de vidro: Desenvolvimento de uma argamassa cimentícia com agregados provenientes de resíduos industriais**

Maria Viana

**M**

2024



MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO  
UNIVERSIDADE DO PORTO

## **O JÚRI**

### **PRESIDENTE**

Doutor Jorge Lino Alves

PROFESSOR CATEDRÁTICO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

### **ORIENTADOR**

Doutor Bárbara Rangel Carvalho

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

### **ARGUENTE**

Doutor Leonardo Santana

PESQUISADOR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL)

# **17**

29 OUTUBRO 2024

**MESTRE** Maria do Socorro Rocha de Castro Wanderley Viana  
**MDIP/166**



Universidade do Porto  
Faculdade de **Belas Artes**  
Faculdade de **Engenharia**

**Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Design Industrial e de Produto**

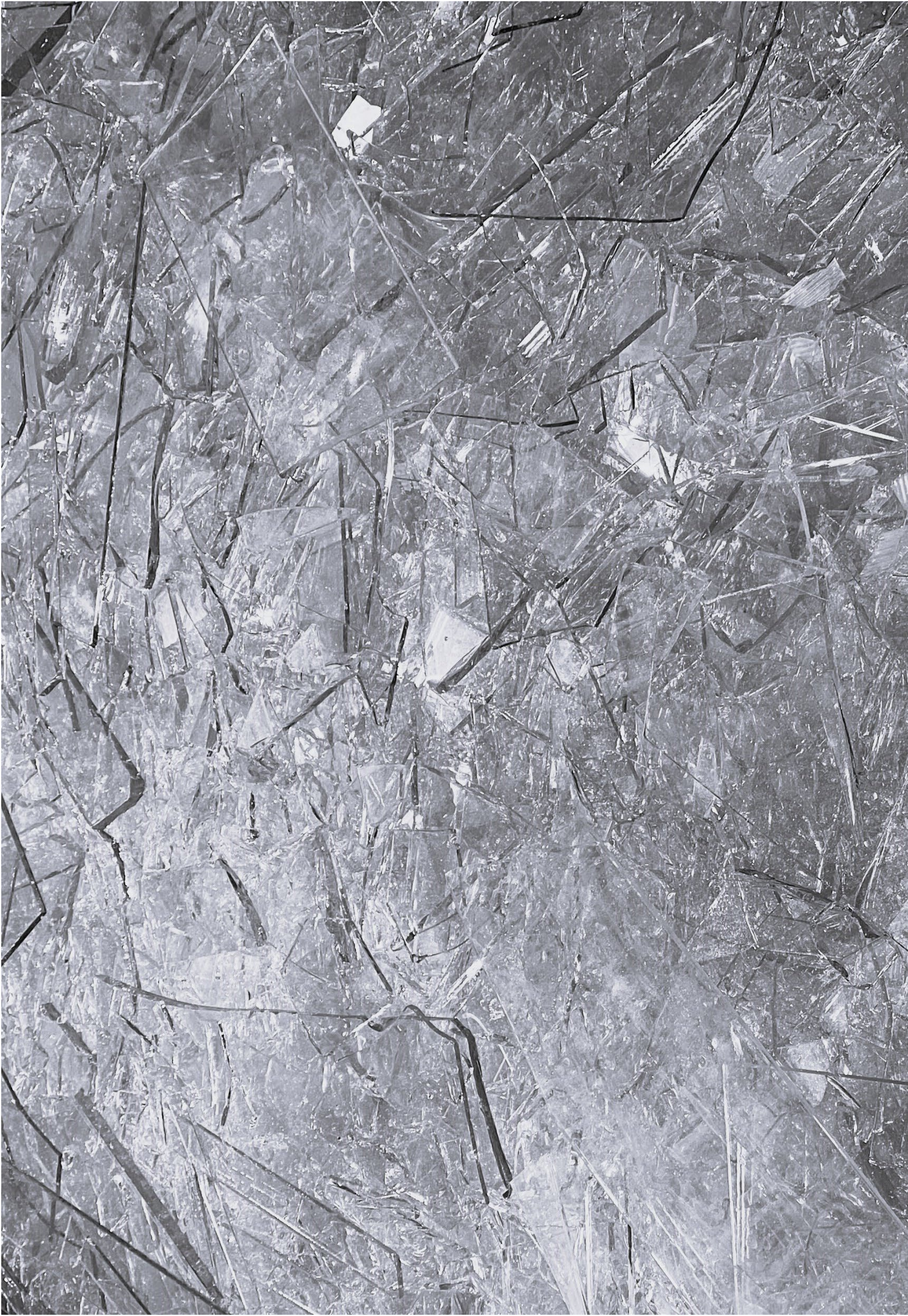
Orientadora: Doutora Bárbara Rangel  
Professora Auxiliar da Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto

Coorientador: Doutor Joaquim Góis  
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



*Aos meus pais*  
*Hilma e Isaac Viana*

## Resumo

A pesquisa se baseia na crescente necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção. Visa mitigar os impactos ambientais dos processos de fabrico tradicionais, como os da indústria cimentícia, através da reutilização de resíduos e de forma a promover a eficiência do uso dos recursos através de uma produção otimizada pela impressão 3D. Este estudo pretende valorizar um dos tipos de resíduos provenientes de processos industriais e reciclagem ao desenvolver uma argamassa cimentícia utilizando resíduos em forma de pó de vidro sódio-cálcicos reciclados como substituinte parcial ao cimento e agregados naturais, e usando a impressão 3D como técnica de construção. O uso de vidro é considerado uma alternativa viável para melhorar as propriedades da argamassa e reduzir a necessidade de matérias-primas tradicionais, como areia e cimento. A produção de cimento contribui significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>, apesar de ser um componente essencial em argamassas de alto desempenho para impressão.

No desenvolvimento deste estudo, os resíduos de vidro foram empregados em um plano experimental que avaliou o comportamento de várias composições com granulometrias e teor de substituição diversos. Seguindo a metodologia do Material Driven Design, cada mistura foi registrada e os parâmetros de Trabalhabilidade, Extrudabilidade e Capacidade de Construção foram analisados para determinar as amostras que obtivessem características adequadas para impressão juntamente com um teor considerável de substituição de materiais. Em seguida, as amostras mais acertadas no processo de calibração na impressora foram selecionadas para os ensaios mecânicos de resistência à tração compressão. Em seguida selecionada uma mistura mais apropriada para a impressão. A peça final foi inspirada em formas orgânicas provenientes dos oceanos, possuindo um desenho que justificasse a tecnologia adotada, e para a sua funcionalidade, a peça se comporta como um elemento arquitetônico de fachadas e paredes podendo agregar iluminação, vegetação e servindo de sistema de ventilação.

Com a modelação desenvolvida, se fez necessário a validação da forma e seu processo de impressão. Para os testes de impressão da peça foi utilizada uma mistura de cimento e água. Em seguida, ajustes de geometria e calibração da impressora foram necessários para a impressão final da peça com o material selecionado, no qual resultou de forma satisfatória. Com este trabalho, conclui-se que é possível utilizar o pó e o resíduo de vidro em substituição ao cimento e a areia como um material alternativo e na impressão 3d. Ao reintegrar esses materiais ao processo construtivo, promove-se uma abordagem pioneira que não apenas enriquece a estética arquitetônica, mas também orienta a indústria da construção para práticas mais sustentáveis e tecnológicas, alinhadas aos desafios contemporâneos de sustentabilidade e inovação.

### Palavras-chave:

Impressão 3D; Argamassas cimentícias; Vidro reciclado; Resíduos industriais; Design sustentável; Materiais inovadores

## Abstract

The research addresses the growing need for sustainable practices in the construction industry, aiming to mitigate the environmental impacts of traditional manufacturing processes, such as those in the cement industry. It emphasizes the reuse of waste materials to enhance resource efficiency, utilizing 3D printing for optimized production. The study focuses on valorizing industrial and recycled waste by developing a cementitious mortar incorporating recycled soda-lime glass powder as a partial substitute for cement and natural aggregates, employing 3D printing as a construction technique. The inclusion of glass is explored as a viable alternative to improve mortar properties while reducing reliance on traditional raw materials like sand and cement. Given that cement production significantly contributes to CO<sub>2</sub> emissions, this approach seeks to maintain high-performance properties while addressing sustainability concerns.

The experimental framework involved evaluating the behavior of various compositions with different particle sizes and substitution ratios of glass waste. Each mix was systematically tested for workability, extrudability, and buildability to identify formulations suitable for 3D printing with significant material substitution rates. The most promising mixes underwent mechanical tests for compressive and tensile strength, leading to the selection of an optimal composition for printing. Inspired by organic forms from marine environments, the final printed piece served as an architectural element for facades and walls, integrating features like lighting, vegetation, and ventilation systems. The validation process required iterative adjustments to the geometry and printer calibration. Initial tests employed a cement-water mixture, followed by fine-tuning for the final print using the selected material, yielding satisfactory results.

This study demonstrates the feasibility of using recycled glass powder as a partial replacement for cement and sand in 3D-printed construction. By reintegrating waste materials into the construction process, the research introduces a pioneering approach that enhances architectural aesthetics while steering the construction industry toward more sustainable and technologically advanced practices, aligning with contemporary challenges of innovation and environmental responsibility.

### Keywords:

3D Printing; Cementitious Mortars; Recycled Glass; Industrial Waste; Sustainable Design; Innovative Materials



## Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus pais pelo apoio incondicional e paciência demonstrados ao longo dos anos em que deixei meu país e viajei para o outro lado do Atlântico durante uma pandemia, com o objetivo de conquistar meus próprios objetivos. Suas palavras de encorajamento e carinho foram fundamentais para que eu persistisse, apesar das dificuldades, atrasos e desafios enfrentados. Dedico este trabalho a eles em reconhecimento à sua constante presença e apoio.

Agradeço aos professores orientadores Bárbara Rangel e Joaquim Góis pela orientação, paciência, disponibilidade para ajudar nos processos práticos da realização deste trabalho. A abordagem amigável foi crucial para me conduzir ao longo deste percurso.

Ao coorientador e doutorando João Teixeira, pela disponibilidade em ajudar e orientar de forma amigável, com todas as questões práticas e teóricas que envolvessem impressão 3D.

Agradeço à disponibilidade de utilização do laboratório do Departamento de Engenharia de Minas, agradeço ao Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e professor José Augusto Fernandes. Como também, a pronta ajuda da vidraria Fonseca em fornecer resíduos para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao meu companheiro pelo apoio contínuo, convivência e incentivo constante, que contribuíram significativamente para minha produtividade e tomada de decisões.

Aos meus familiares e amigos, mesmo que não compreendendo totalmente o que eu fazia nesta nova realidade, compartilhar minhas angústias e conquistas foi essencial para alcançar este ponto.

Deixo aqui meu mais profundo agradecimento a todos.



## Índice

|      |                       |
|------|-----------------------|
| VI   | Resumo                |
| VII  | Abstract              |
| IX   | Agradecimentos        |
| XI   | Índice                |
| XIV  | Lista de Figuras      |
| XVI  | Lista de Tabelas      |
| XVII | Lista de Gráficos     |
| XVII | Lista de Abreviaturas |

### I. Introdução

1. Contexto e justificação da pesquisa 18
2. Objetivos 20
3. Metodologia 21
4. Estrutura da dissertação 22

### II. Estado da Arte

#### 1. Introdução 23

#### 2. Resíduos Industriais: O ciclo do vidro 25

- 2.1 Propriedades e caracterização 25
- 2.2 Materiais utilizados e o processo de fabricação do vidro 26
- 2.3 Geração de resíduos de vidro e impacto ambiental 29
- 2.4 Reintegração de resíduos industriais: Reciclagem e reutilização 31

#### 3. Argamassas cimentícias com adição de pó de vidro 35

- 3.1 Metodologias e discussões 35
- 3.2 Síntese da literatura 40

#### 4. Impressão 3D de argamassas cimentícias 42

- 4.1 Tecnologias de impressão 3D de argamassas cimentícias 44
- 4.2 Parâmetros de uma argamassa cimentícia imprimível 46

#### 5. Impressão 3D de argamassas cimentícias com adição do vidro 50

- 5.1 Metodologias e discussões 50

#### 6. Design e sustentabilidade 52

- 6.1 Economia circular 52
- 6.2 O papel do designer na sustentabilidade 54

## **7. Pesquisa de mercado 55**

### **7.1 O uso do cimento e pó de vidro reciclado em grandes estruturas 55**

#### **7.1.1 Provencher Roy Architects 55**

### **7.2 A impressão 3D de Vidro 58**

#### **7.2.1 MIT - Mediated Matter 59**

#### **7.2.2 ETH Zurich - Group for Complex Materials 59**

### **7.3 A impressão 3D de elementos arquitetônicos 59**

#### **7.3.1 Zaha Hadid + ETH Zürich + incremental3D 60**

#### **7.3.2 TU Eindhoven 61**

#### **7.3.3 STUDIO RAP 62**

#### **7.3.4 ICON 65**

### **7.4 A impressão 3D com impressoras WASP 66**

#### **7.4.1 WASP + Mario Cucinella Architects 67**

#### **7.4.1 Barlett School of Architecture 69**

### **7.5 A impressão 3D de produtos cimentícios 70**

#### **7.5.1 Emerging Objects 70**

#### **7.5.2 Emerging Objects 71**

## **III. Caso de Estudo**

### **1. Objetivos 74**

### **2. Parâmetros de capacidade de impressão 75**

### **3. Materiais e métodos 75**

### **4. Plano Experimental 79**

#### **4.1 Compreensão do material 80**

##### **4.1.1 Ensaio da primeira fase: Compreensão do material 82**

##### **4.1.2 Composições de argamassas cimentícias com substituição parcial de cimento por pó de vidro 82**

##### **4.1.3 Composição de argamassas cimentícias com substituição de areia por resíduo de vidro 86**

##### **4.1.4 Teste cromático 90**

#### **4.2 Calibração da impressora e primeiras impressões 92**

#### **4.3 Ensaio mecânicos 100**

### **5. Desenvolvimento do Produto e impressão do material 104**

#### **5.1 Conceito 104**

#### **5.2 Estudos da Forma e modelagem 109**

#### **5.3 Prototipagem 110**

#### **5.4 Modelação final 112**

#### **5.5 Simulação de painel 113**

#### **5.6 Impressão 114**

#### **5.7 Proposta final de aplicação 116**

#### **5.8 Produto 11**

## **IV. Considerações Finais**

**1. Conclusão 124**

**2. Limitações e melhoramentos futuros 126**

**Referencias bibliográficas 127**

**Informações Anexas**

Anexo 01 - Desenhos técnicos **134**

Anexo 02 - Composições **135**

## Lista de Figuras

- Figura 01** – Processo de fabricação do vidro Float (devidros.com.br 2020) **27**
- Figura 02** – Processo produtivo do vidro (adaptada de PROPEQ 2021) **28**
- Figura 03** – Casco (vidro em fim de vida) misturados (Cascovidro.pt sem data) **29**
- Figura 04** – Ciclo da logística reversa do vidro (Adaptado de ABRABE 2020) **32**
- Figura 05** – Partículas de resíduo de vidro com diferentes tamanho e formas após processo de moagem e crivagem (imagem do autor) **39**
- Figura 06** – Cofragem (portaldosandaimes.com 2024) **43**
- Figura 07** – Processos de Manufatura Aditiva na Construção (Adaptado de (Al Rashid et al., 2020) **44**
- Figura 08** – Diagrama da Técnica de Binder Jetting (Manufactur3Dmag.com) **45**
- Figura 09** – Diagrama da Técnica de Extrusão FDM (Manufactur3Dmag.com) **46**
- Figura 10** – Parâmetros para processos de impressão 3D (Adaptado de Al Rashid et al.) **47**
- Figura 11** – Diagrama de Economia Circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015) **51**
- Figura 12** – Pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021) **55**
- Figura 13** – Pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021) **55**
- Figura 14** – Passarelas e jardim sob as pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021) **56**
- Figura 15** – Passarelas e jardim sob as pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021) **56**
- Figura 16** – Bloco impresso em 3D (NTU Singapore 202) **57**
- Figura 17** – Protótipo com iluminação (Mediated Matter 2014) **58**
- Figura 18** – Processo de impressão do filamento de vidro (Mediated Matter 2014) **58**
- Figura 19** – Processo de impressão do filamento de vidro (Mediated Matter 2014) **58**
- Figura 20** – Vários objetos vítreos criados com uma impressora 3d (ETH Zurich 2019) **59**
- Figura 21** – Fases de endurecimento da resina e transformação em vidro (ETH Zurich 2019) **60**
- Figura 22** – Ponte Striatum em Veneza (incremental3D 2021) **60**
- Figura 23** – Ponte Striatum em Veneza (incremental3D 2021) **60**
- Figura 24** – Ponte em Striatum em Veneza (incremental3D 2021) **61**
- Figura 25** – Ponte em Nijmegen (Michiel van der Kley 2021) **62**
- Figura 26** – Ponte em Nijmegen (Michiel van der Kley 2021) **62**
- Figura 27** – Fachada da loja em Amsterdam (Studio RAP 2014) **62**
- Figura 28** – Fachada da loja em Amsterdam (Studio RAP 2014) **62**
- Figura 29** – Processo de impressão dos ladrilhos (Studio RAP 2014) **63**
- Figura 30** – Diversidade de peças impressas (Studio RAP 2014) **63**
- Figura 31** – Detalhes do efeito orgânico e dinâmico da fachada (Studio RAP 2014) **63**
- Figura 32** – Detalhes do efeito orgânico e dinâmico do painel (Studio RAP 2019) **64**
- Figura 33** – Detalhes do efeito orgânico e dinâmico do painel (Studio RAP 2019) **64**
- Figura 34** – Impressão das peças e peças em estado final (Studio RAP 2019) **64**
- Figura 35** – Peças em estado final (Studio RAP 2019) **64**
- Figura 36** – Impressora Phoenix (ICON 2024) **65**
- Figura 37** – Braço robótico (ICON 2024) **65**
- Figura 38** – Impressora Phoenix em uso (ICON 2024) **66**
- Figura 39** – Projeto Community First Village de casas construídas para pessoas sem-teto (ICON 2020) **66**
- Figura 40** – Render do Hotel El Cosmico a ser construído com o estúdio BIG (ICON 2023) **66**
- Figura 41** – BIG Delta WASP 12MT em processo de impressão (WASP 2015) **67**
- Figura 42** – Estrutura de 12 metros da impressora (WASP 2015) **67**

**Figura 43** – Protótipo TECLA sendo impresso pela impressora WASP Crane (Italdron 2021) **68**

**Figura 44** – Protótipo TECLA sendo impresso pela impressora WASP Crane (Italdron 2021).**68**

**Figura 45** – Protótipo TECLA finalizado (WASP 2021) **68**

**Figura 46** – Protótipo TECLA finalizado (WASP 2021) **68**

**Figura 47** – Protótipos do projeto Terra Mound (Rameshwari Jonnalagedda 2024) **69**

**Figura 48** – Protótipos do projeto Terra Mound (Rameshwari Jonnalagedda 2024) **69**

**Figura 49** – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024) **70**

**Figura 50** – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024) **70**

**Figura 51** – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 52** – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 53** – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 54** – Pavilhão Bloom (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 55** – Pavilhão Bloom (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 56** – Pavilhão Bloom (Matthew Millman2024) **71**

**Figura 57** – Rejeitos de produção coletados e aptos para reciclagem da vidraria Fonseca **76**

**Figura 58** – Rejeitos de produção coletados e aptos para reciclagem da vidraria Fonseca **76**

**Figura 59** – Rejeitos de produção da vidraria Fonseca para serem triturados e despejados em aterro **76**

**Figura 60** – Resíduos de vidro antes de serem quebrados manualmente **77**

**Figura 61** – Resíduos de vidro depois de serem quebrados manualmente **77**

**Figuras 62** – Crivagem a 2,36mm **77**

**Figuras 63** – Moagem em almofariz **77**

**Figuras 64** – Crivagem em agitador de peneiras **77**

**Figuras 65** – Partículas de vidro menores que 1,7mm **77**

**Figuras 66** – Britador de maxilas **78**

**Figuras 67** – Resíduos após britagem **78**

**Figuras 68** – Resultado após contínuas operações **78**

**Figuras 69** – Resultantes da crivagem de variadas granulometrias **78**

**Figuras 70** – Resultantes da crivagem de variadas granulometrias **78**

**Figura 71** – Fluxograma de realização dos ensaios **81**

**Figura 72** – Ensaio da capacidade de extrusão de amostras com pó de vidro **84**

**Figura 73** – Ensaio da capacidade de construção de amostras com pó de vidro **84**

**Figura 74** – Extrusão manual de amostras com diferentes teores de água **85**

**Figura 75** – Provetes dos ensaios de abaixamento das amostras com pó de vidro **86**

**Figura 76** – Ensaio da capacidade de extrusão de amostras com resíduo de vidro **88**

**Figura 77** – Ensaio da capacidade de construção de amostras com resíduo de vidro **88**

**Figura 78 a 81** – Ensaio cromático da argamassa com oxido de ferro azul **90**

**Figura 82 a 84** – Resultado dos experimentos das argamassas com oxido de ferro **91**

**Figura 85** – Delta Wasp 40100, impressora utilizada neste estudo **92**

**Figura 86** – Impressão das Referências 1 e 2 **93**

**Figura 87** – Ensaio de abaixamento com cone metálico **94**

**Figuras 88** – Teste de impressão da Referência 3 **94**

**Figuras 89** – Teste de impressão da Referência 3 **94**

**Figuras 90** – Teste de impressão da Referência 4 **94**

**Figuras 91** – Teste de impressão da Referência 4 **94**

**Figura 92** – Teste de impressão da amostra C10 **95**

**Figuras 93** – Teste de impressão da amostra C80 **95**

**Figuras 94** – Teste de impressão da amostra C80 **95**

**Figuras 95** – Teste de impressão da amostra CPR 80+30 **97**

**Figuras 96** – Teste de impressão da amostra CPR 80+30 **97**

**Figuras 97** – Teste de impressão da amostra CPR 80+18 **97**

**Figuras 98** – Teste de impressão da amostra CPR 80+18 **97**

**Figuras 99** – Teste de impressão da amostra CPR 100 **98**

**Figuras 100** – Teste de impressão da amostra CPR 100 **98**

**Figura 101** – Teste de impressão da amostra CPR 100+30 **98**

**Figuras 102** – Teste de impressão da amostra CPR 100+25 **99**

**Figuras 103** – Teste de impressão da amostra CPR 100+25 **99**

**Figura 104** – Preparação dos provetes para ensaios mecânicos **101**

**Figura 105** – Provetes em cura por imersão **101**

**Figura 106** – Provetes em cura por imersão **101**

**Figura 107** – Ensaio de resistência à flexão **101**

**Figura 108** – Ensaio de resistência à compressão **102**

**Figura 109** – Ensaio de resistência à compressão **102**

**Figura 110** – A caixa de água de Olinda, Brasil à esquerda; e o Pavilhão de Verificação de Óbitos, à direita. Arquiteto Luiz Nunes. (Brazil Builds 1943) **105**

**Figura 111** – Painel com imagens de referência de formas orgânicas da natureza. (imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest e disponíveis no Pinterest.com) **107**

**Figura 112** – Painel com imagens de referência de impressões 3D e outras esculturas com formas orgânicas (imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest e disponíveis no Pinterest.com) **108**

**Figura 113** – Painel com imagens de referência de Cobogós e fachadas perfuradas (imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest e disponíveis no Pinterest.com) **109**

**Figura 114** – Modelos desenvolvidos com Autodesk Fusion de explorações da forma inspiradas nas ondulações da água **110**

**Figura 115** – Modelos impressos em cimento e com a mistura selecionada **111**

**Figura 116** – Modelos impressos em cimento, areia e água **112**

**Figura 117** – Modelo impresso com acúmulo de material nos cantos **112**

**Figura 118** – Modelos impressos sem e com a adição de vidro **112**

**Figura 119** – Modelação da peça final a ser impressa **113**

**Figura 120** – Modelação das peças arranjadas em painel **114**

**Figura 121** – Modelação das peças arranjadas em painel em forma de Cobogó **114**

**Figura 122** – Validação da forma e impressão das peças finais **115**

**Figura 123** – Validação da forma e impressão das peças finais **115**

**Figura 124** – Validação da forma e impressão das peças finais **116**

**Figura 125** – Montagem de aplicação da peça em forma de cobogó. (Imagem de fundo retirada de banco de imagens splash.com) **117**

## Lista de Tabelas

**Tabela 01** – Tabela síntese de estudos de pó e resíduo de vidro **41**

**Tabela 02** – Parâmetros de impressão para o material **48**

**Tabela 03** – Tabela síntese da pesquisa de mercado **72**

**Tabela 04** - Composição de argamassas cimentícias com substituição parcial de cimento por pó de vidro **83**

**Tabela 05** - Composição de amostras com substituição de areia por resíduo de vidro **87**

**Tabela 06** - Composições de argamassas para a calibração da quantidade de areia utilizada **94**

**Tabela 07** - Composições de argamassas para a calibração da substituição de areia por resíduo de vidro **96**

**Tabela 08** - Composições de argamassas para a calibração da substituição dupla de pó e resíduo de vidro **97**

**Tabela 09** - Composições de argamassas para a calibração da substituição dupla de pó e resíduo de vidro **99**

**Tabela 10** - Composições de argamassas para os ensaios mecânicos **100**

**Tabela 11** – Resultados dos ensaios de resistência à flexão **102**

**Tabela 12** – Resultados dos ensaios de resistência à compressão **103**

## Lista de Gráficos

**Gráfico 01** – Variação do abaixamento das amostras com pó de vidro **85**

**Gráfico 02** – Proporção dos materiais das composições com pó de vidro **86**

**Gráfico 03** – Variação do abaixamento das composições desenvolvidas **89**

**Gráfico 04** – Proporção dos materiais das composições com resíduo de vidro **89**

**Gráfico 05 e 06** – Média dos resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão **103**

## Lista de Abreviaturas

**AM** Additive Manufacturing

**3DP** Tridimensional Printing

**3DCP** 3D Concrete Printing

**CP** Cimento Portland

**FBAUP** Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto

**FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**FEVE** The European Container Glass Federation

**MDIP** Mestrado de Design Industrial de Produto

**UE** União Europeia

**WASP** World's Advanced Saving Project

**SCM** Supplementary Cimentitious Materials

## I. Introdução

Esta investigação foi desenvolvida no contexto da finalização do Mestrado de Design Industrial e de Produto (MDIP), na Faculdade de Engenharia (FEUP) juntamente com a Faculdade de Belas Artes (FBAUP) da Universidade do Porto. Para este capítulo será introduzido o contexto para qual este estudo foi desenvolvido: o desenvolvimento de uma argamassa cimentícia imprimível em 3D utilizando o pó de vidro reciclado como agregado proveniente de Resíduos Industriais.

### 1. Contexto e justificação da pesquisa

Os setores da indústria da construção civil são reconhecidos como essenciais para o progresso econômico e social, por outro lado, é uma das principais consumidoras de recursos naturais não renováveis e energia. Devido a uma série de fatores, esses setores contribuem significativamente para a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) decorrentes da produção de concretos e argamassas cimentícias como exemplo, no processo de fabricação do cimento, que é essencial o emprego de energia derivada da queima de combustíveis fósseis, como também, essas emissões são geradas pela reação de calcinação que produz o clínquer, um componente importante para a produção do cimento. (Basto et al., 2019)

Adicionalmente, a produção de cada tonelada de cimento resulta na emissão estimada de 750 kg de  $\text{CO}_2$ , o que representa um considerável impacto ambiental ao contribuir aproximadamente com 8% das emissões globais de  $\text{CO}_2$  (Andrew, 2019). Para além destes impactos há ainda a gestão inadequada dos resíduos resultando em uma quantidade significativa desses materiais sendo depositada em aterros.

(Yazdani et al., 2020)

Para mitigar esses problemas, é crucial que o setor da construção e indústria adotem práticas mais responsáveis e sustentáveis, inclua a utilização de materiais reciclados, implemente tecnologias mais eficientes e promova uma gestão dos resíduos. No setor da construção civil, não havia práticas estabelecidas de reutilização, reciclagem, ou direcionamento adequado para valorização ou eliminação dos resíduos produzidos até pouco tempo atrás.

(Santos et al., 2017)

Várias estratégias que se utilizam de diversos resíduos têm sido propostas, a exemplo dos sólidos urbanos, agroindustriais e industriais, como substitutos parciais do cimento na criação de materiais (Morais, A. et al., 2022). Entre os diversos materiais gerados dos resíduos sólidos urbanos e industriais, o vidro se destaca por ser não biodegradável e por ocupar grande quantidade de espaço

nos aterros sanitários. As indústrias que empregam vidro como matéria-prima enfrentam um grande problema de poluição ambiental e riscos à saúde pública devido à geração de rejeitos (Younes et al., 2018). Portanto, uma solução alternativa e economicamente viável para o descarte seguro desses resíduos seria utilizá-los em matrizes cimentícias na construção civil.

Através deste estudo é buscado desenvolver um material cimentício adequado para a tecnologia de impressão 3D, ao proporcionar uma redução de custos com matéria-prima com substituição parcial de cimento e areia pelos resíduos em diferentes granulometrias. Para além da reutilização dos resíduos industriais, há a estratégia da redução de resíduos pelo próprio processo de impressão 3D, ao proporcionar desempenho técnico e adaptabilidade.

As tecnologias de impressão 3D está ganhando destaque em várias indústrias. Sua habilidade de adicionar material somente onde é necessário permite a criação de formas complexas, eliminando desperdícios e a necessidade de moldes. Embora essas vantagens sejam significativas para a construção civil, a implementação ainda é limitada por normas de segurança. Contudo, sua utilidade imediata no design é clara, oferecendo a possibilidade de conceber peças complexas e personalizáveis. (Teixeira, 2018)

Entre as diversas aplicações da impressão 3D, uma outra forma de nomear a manufatura aditiva, no setor da construção ainda não se vê tão amplamente utilizado no mercado. E apesar dos avanços, a impressão 3D tem sido objeto de interesse para pesquisadores nas últimas décadas. Apesar das melhorias nos processos de manufatura aditiva (MA) para atender aos requisitos da construção, ainda é necessário mais desenvolvimento de materiais capazes de substituir os convencionais do mercado e que sejam compatíveis com os processos e parâmetros da fabricação aditiva. (Al Rashid et al., 2020)

Considerando este panorama, essas estratégias são uma tentativa de promover uma abordagem mais equilibrada, responsável e sustentável para a construção civil, o design, a fabricação de produtos e os processos industriais. Assim como qualquer objeto, um edifício também tem vida útil e estes precisam estar cada vez mais alinhados com as demandas de sustentabilidade, desempenho e segurança. Trazer a discussão do que realmente é ser sustentável é fundamental para o papel do designer na criação de novos produtos e materiais, e não se limitar a agregar valor a estes apenas pela questão de incentivos fiscais, certificações ambientais ou tendências de mercado.

## 2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é valorizar o resíduo de vidro, especificamente o pó de vidro, por meio da tecnologia de impressão 3D. Para alcançar esse objetivo, será desenvolvida uma argamassa com propriedades adequadas para impressão, utilizando materiais cimentícios como base e incorporando o pó de vidro e outros resíduos de vidro. Com esse material, será criado um produto por meio da impressão 3D, com potencial aplicação na fabricação de elementos destinados à construção civil e à arquitetura, com foco em design e sustentabilidade.

Além disso, há um desejo pessoal de contribuir para as áreas de arquitetura e engenharia civil. É relevante expandir os campos em que a produção industrial não apenas evite agravar problemas ambientais, mas também busque ser inovadora e de interesse para a sociedade.

Assim, os objetivos secundários desta pesquisa incluem:

- Investigar diferentes composições de argamassa incorporando vidro proveniente de resíduos industriais e ajustar as proporções de Cimento Portland (CP) e areia;
- Avaliar a eficiência de impressão do material resultante e identificar características que o diferenciem da argamassa convencional;
- Desenvolver um material sustentável, com atratividade estética na peça final impressa, demonstrando possibilidades inovadoras de geometria e textura.

### 3. Metodologia

Para atingir os objetivos, foi estruturada uma metodologia interna no laboratório, com o propósito de organizar o processo de investigação. Inicialmente, realizou-se um estudo do estado da arte, apresentado no segundo capítulo, por meio de uma revisão bibliográfica fundamentada em artigos científicos, livros, dissertações e estudos de mercado sobre aplicações existentes, utilização de resíduos e tecnologias vigentes. A pesquisa baseou-se, em sua maior parte, em trabalhos desenvolvidos em países estrangeiros. Foram analisadas as iniciativas de universidades, empresas e do setor privado, com foco no desenvolvimento de novos materiais, processos de impressão 3D e práticas sustentáveis.

Para este estudo foi fundamental conhecer os a tecnologia de impressão 3D com materiais cimentícios, o reaproveitamento de resíduos, mas, principalmente entender as propriedades dos materiais. Para o caso de estudo, a metodologia Material Driven Design (MDD) é utilizada, e tem como propósito o desenvolvimento do material como objetivo primário, independentemente do produto a ser criado. Com isso, no terceiro capítulo, com base em um plano experimental, foram realizadas diferentes amostras de materiais cimentícios com o vidro em variadas granulometrias e composições. Os rejeitos de vidro coletados foram reduzidos a partes menores graças a um britador de maxilas e depois peneirados em diferentes peneiros para serem incorporadas à argamassa. Neste processo houve a testagem de argamassas cimentícias com a substituição total da areia natural por agregados de vidro e a substituição parcial do cimento pelo pó de vidro. Após a testagem de composições do material, testes de impressão foram feitos para avaliar a desempenho deste em termos de Trabalhabilidade, Extrudabilidade e Capacidade de Construção, analisar seu comportamento mecânico e a durabilidade das peças.

Com base nestes conhecimentos adquiridos, descobrir qual mistura seria mais adequada para impressão. No seguimento, a modelação 3D da peça foi desenvolvida, tendo em conta limitantes do processo de impressão, a escala da impressora, a quantidade de material disponível, e a funcionalidade da peça. Testes foram feitos com uma mistura de cimento e água para validar a geometria e verificação da forma. E por fim, com os ajustes feitos respondendo às questões postas nesta etapa, a impressão final da peça foi realizada no material selecionado numa impressora Delta WASP 40100 para validar a capacidade do material.

## 4. Estrutura da dissertação

Este trabalho é estruturado em quatro capítulos:

**Primeiro capítulo** com a Introdução, é feita a apresentação do tema da tese e como o trabalho é organizado, o seu contexto, objetivos e metodologia.

No **segundo capítulo** é apresentado o Estado da Arte, é feita uma revisão de literatura dos temas da dissertação: o vidro, desde seus processos industriais até a geração de resíduos e sustentabilidade, o uso do resíduo de vidro em argamassas cimentícias, um panorama da impressão 3D e da impressão de argamassas. Foi feito um levantamento de técnicas de impressão 3D, assim como um panorama de peças, produtos, materiais e projetos que utilizam argamassas impressas com ou sem a adição de resíduos de vidro.

No **terceiro capítulo** é apresentada a fase experimental, são desenvolvidas amostras de argamassas cimentícias com a substituição da areia pelo vidro reciclado em diferentes granulometrias e composições. Misturas com a substituição total e parcial dos materiais pelo vidro são desenvolvidas. Em seguida, testes de extrusão e impressão foram realizados com as misturas selecionadas, assim como ensaios mecânicos realizados em laboratório. A partir da mistura escolhida para a impressão final, será mostrado o desenvolvimento do produto, mostrando os conceitos utilizados, o estudo da forma, o desenho da peça e suas variações, a modelagem 3D para impressão final e a validação do produto.

No **quarto capítulo**, Considerações finais, são apresentados os resultados do trabalho desenvolvido no capítulo 3, ao mostrar as dificuldades e constrangimentos encontrados. Assim como mostrar um resumo de todo o trabalho e proposições para um desenvolvimento futuro. Ao fim, são incluídas as referências bibliográficas, desenhos técnicos e as composições das amostras realizadas.

## //. Estado da Arte

### 1. Introdução

Este trabalho orbita ao redor do tema da sustentabilidade, na tentativa de promover uma abordagem mais equilibrada, responsável e sustentável para a construção civil, o design, a fabricação de produtos e os processos industriais. Trazer a discussão sobre que é realmente ser sustentável é fundamental para o papel de todo designer na criação de novos produtos e materiais, não apenas se limitando a agregar valor a estes pela questão de incentivos fiscais, certificações ambientais ou tendências de mercado. Entretanto, a responsabilidade do tema da sustentabilidade deve ser compartilhada com outros segmentos, como por exemplo o setor da construção civil, em que uma das soluções acontece quando a longevidade da infraestrutura de edifícios precisa ser incentivada financeiramente e legislativamente para promover adaptações de baixo carbono e reabilitações que prolonguem a vida útil dos edifícios sem comprometer sua eficiência energética operacional. (Environment Programme, 2022)

O conceito de desenvolvimento sustentável, conforme estabelecido no Relatório Brundtland de 1987, refere-se a uma abordagem que satisfaz as demandas do presente sem prejudicar a capacidade das gerações futuras em suprir suas próprias necessidades. Dentre os vários discursos de sustentabilidade, o escolhido refere-se a uma abordagem politicamente pragmática, destacando a vertente econômica e tecnológica da sustentabilidade. Essa perspectiva reconhece que a economia de mercado pode liderar a transição para o desenvolvimento sustentável por meio da introdução de "tecnologias limpas", da contenção do crescimento populacional e do estímulo a processos de produção e consumo ecologicamente orientados. (Lima, 2003)

Essa perspectiva sobre sustentabilidade argumenta que é possível harmonizar o crescimento econômico com a preservação ambiental. Ela reconhece que a dinâmica do sistema capitalista não apenas pode se adaptar às novas exigências ambientais, mas também pode transformá-las em estímulos adicionais para a competitividade produtiva. Segundo essa visão, é viável conciliar economia e ecologia, aumentando a produção enquanto se diminui o consumo de recursos naturais e a quantidade de resíduos industriais. (Lima, 2003)

Porém, segundo o relatório de situação global para edifícios e construções de 2022, elaborado pela *United Nations Environment Programme*, o setor dos edifícios e da construção não está no bom caminho para alcançar a descarbonização até 2050, diante das taxas de emissões de CO<sub>2</sub> que se sobrepuseram aos anos anteriores em 5%. O setor global de construção, para além de ser um dos maiores consumidores de matéria-prima, consome aproximadamente 30% da energia global, sendo

responsável por cerca de 27% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. A produção de concreto, aço e alumínio, materiais importantes utilizados na construção de edifícios, adicionou mais 4% do uso global de energia e 6% das emissões globais em 2021. (Environment Programme, 2022)

A produção global de cimento tem crescido muito rapidamente nos últimos anos e, após os combustíveis fósseis e alterações do uso do solo, é a terceira maior fonte de emissões antropogênicas de dióxido de carbono (Andrew, 2019). Ainda segundo o relatório das Nações Unidas, se estratégias de eficiência de materiais fossem aplicadas apenas nos países do G7, incluindo o uso de materiais reciclados, poderia reduzir as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de materiais de edifícios residenciais em mais de 80% até 2050. (Environment Programme, 2022)

Ao considerar esta visão e a problemática ambiental relacionada aos impactos causados pela indústria da construção, cimentícia e do descarte de resíduos, é compreendida a necessidade de traçar estratégias para materiais mais eficientes. Com isso, esta investigação busca alternativas para a criação e melhoramento de materiais, como também, a introdução do uso de tecnologias de impressão 3D, considerando as limitações impostas por esse processo, uma técnica de produção que tem a capacidade de converter materiais em objetos sem gerar grandes desperdícios e que promove a digitalização de processos, tornando-os mais eficientes.

Nesta seção será apresentada a revisão de literatura para a tomada de decisões da fase experimental. Foram mostradas técnicas, processos utilizados, assim como as tecnologias para perceber potencialidades de valorização de resíduos, o aperfeiçoamento de técnicas semelhantes e o desenvolvimento de um material que esteja aliado com o caráter da sustentabilidade. Para, conseqüentemente, verificar o que é possível ser utilizado na impressão 3D de argamassas e na criação de produtos arquitetônicos.

## 2. Resíduos Industriais: O ciclo do Vidro

Este subcapítulo se propõe a explorar o material de interesse desta investigação, o ciclo de vida do vidro, desde sua produção até a gestão de seus resíduos, destacando os principais aspectos que contribuem para sua sustentabilidade e os desafios enfrentados na sua disposição.

Dentre a diversidade de materiais que compõem os Resíduos Industriais, o vidro não é biodegradável e ocupa grandes áreas de aterros sanitários. Neste contexto, as indústrias que empregam o vidro como matéria-prima têm na geração do rejeito um grande problema de poluição ambiental e de riscos para a saúde pública (Younes et al., 2018). Posto isso, a utilização de resíduos de vidro moído como suplemento ou aglomerante ao material cimentício pode ser vantajosa do ponto de vista ambiental e, às vezes, econômico, uma vez que transforma grandes quantidades de resíduos em produtos de valor agregado. (Corinaldesi et al., 2016)

### 2.1 Propriedades

O que dá o vidro propriedades singulares é a sua estrutura atômica. O vidro é um material cerâmico não cristalino, de alta sílica, inerte, amorfo e não biodegradável, formado por silicatos não cristalinos contendo óxidos de CaO (cálcio), Na<sub>2</sub>O (sódio), K<sub>2</sub>O (potássio) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumínio), que têm uma influência direta nas propriedades do material. A composição química do vidro pouco mudou nesses 5 mil anos, e o vidro mais utilizado no mundo é o de soda-cal, que consiste em 66–75% de SiO<sub>2</sub> (sílica), 12–17% de Na<sub>2</sub>O (sódio) e 6–12% de CaO (cal) (Bauer, 2008).

O vidro se distingue de outros materiais por várias características, entre elas, ser não poroso ou absorvente, ser um excelente isolante, ter baixo coeficiente de expansão e condutividade térmica (Bauer, 2008). Entre outras propriedades, as mais intrínsecas são a durabilidade e a transparência. Outras propriedades tornam-se significantes de acordo com o uso que é colocado ao material, como: transmissão de luz/radiação, reflexão, absorção, índice de refração, propriedades térmicas, resistência, dureza e resistência à abrasão, durabilidade Química, às intempéries, densidade, resistência ao Fogo, isolamento acústico. (Giacomini, 2007)

## 2.2 Materiais utilizados e o processo de fabricação do vidro

O vidro é um material versátil e amplamente utilizado em diversas indústrias, desde a construção civil até a fabricação de embalagens e dispositivos eletrônicos. Não se sabe exatamente a data ou o lugar onde o vidro foi descoberto. Historiadores apontam que o primeiro vidro produzido pelo homem veio da Síria, quase 3 mil anos antes de Cristo. As primeiras janelas foram produzidas aproximadamente no primeiro ou no segundo século da era cristã. No século XX, as pesquisas das propriedades físicas e químicas possibilitaram novos tipos de vidro e novas indústrias: vidros temperados, vidros laminados, fibras de vidro, fibras óticas e vidro cerâmico. (Bauer, 2008)

O uso do vidro plano na construção aumentou significativamente no século XX. E no começo do século passado, o vidro plano fabricado para vidraças era feito pelo processo do cilindro, um aperfeiçoamento do vidro soprado. Porém era um processo caro e gerador de produtos de baixa qualidade, inaceitável para, por exemplo, janelas de carros e vitrines. Com a invenção dos processos Fourcault (1914), Libbey-Owens (1920), Pittsburgh (1925), respetivamente, a produção do vidro foi se tornando mais barata e eficiente, até que na década de 50 foi inventado o processo *Float* de produção de vidro polido, que permitiu redução de custos, mantendo propriedades dos processos anteriores e melhorando sua qualidade. (Bauer, 2008)

O vidro na arquitetura esta presente sob diversas formas. Desde sua aplicação em janelas, sob a forma chapas planas ou curvas de espessura variável, até sua utilização na forma de blocos e fibras. Utilizado em janelas, portas, divisórias, como elemento decorativo e mesmo como parte de um sistema construtivo (fachadas cortina, fachadas pele de vidro, *structural glazing*). Há também os vidros de segurança, impulsionados pela indústria automobilística e construção civil, que ao se fragmentarem são menos suscetíveis de causar ferimentos graves do que o vidro recozido. Esses vidros podem ser: temperados, laminados e aramados. (Bauer, 2008)

Como também, outras cores podem ser obtidas com vidros laminados, e alguns vidros apresentam desenhos ou padrões em sua superfície, conhecidos como vidros impressos ou fantasia. Pode-se aplicar sobre a superfície do vidro uma pequena camada de metal ou óxido metálico, conferindo um aspeto espelhado. Esses vidros são conhecidos como Termo refletores ou espelhados. (Bauer, 2008)

A quantidade de tipos de vidro que podem ser produzidos é infinita, dado o número de materiais disponíveis e necessários para a fabricação do vidro, com uma grande variedade de composições e desempenhos específicos. Contudo, os vidros mais comuns em edificações se enquadram em cinco grupos químicos distintos:

**Vidros de Soda-Cal:** Estes são os vidros mais comuns, utilizados em vidros planos, lâmpadas, recipientes, entre outros. A família de vidros soda-cal é a principal no desenvolvimento do processo "float" um vidro de qualidade superior, podem ser os vidros incolores e coloridos (Termo absorventes) produzidos pela introdução de óxidos metálicos, resultando em cinza, o bronze, azul e verde.

**Vidros de Sílica Fundida ou Quartzo:** Estes vidros são compostos principalmente por sílica, apresentando altas temperaturas de fusão e de trabalho, baixo coeficiente de expansão térmica (o que confere resistência ao choque térmico) e alta resistência química. O alto ponto de fusão torna sua produção cara e difícil, sendo usados principalmente em laboratórios de alta tecnologia.

**Vidros de Borossilicato:** Conhecidos por sua resistência à corrosão química e baixo coeficiente de expansão térmica, um terço do coeficiente do vidro soda-cal (embora seis vezes maior que o da sílica fundida). Esta família é amplamente utilizada em utensílios domésticos (como Pyrex) e de laboratório, lâmpadas e vidros resistentes ao fogo, aumentando a resistência ao impacto e reduzindo o coeficiente de expansão.

**Vidros de Chumbo:** Caracterizados por baixas temperaturas de fusão e trabalho, alto índice de refração e densidade. A quantidade de óxido de chumbo pode variar bastante (até três vezes), com vidros de alto teor de chumbo (até 80% de óxido de chumbo) sendo usados como protetores contra radiação.

**Vidros de Silicato de Alumínio:** Com mais de 50% de sílica, esses vidros possuem um teor de alumínio dez vezes maior que o dos vidros soda-cal. O óxido de boro também está presente, resultando em vidros com grande durabilidade química.



**Figura 01** – Processo de fabricação do vidro Float (devidros.com.br 2020)

O ciclo de vida do vidro começa com a extração das matérias-primas e segue com a produção, distribuição, uso e, finalmente, a disposição ou reciclagem dos resíduos para a fabricação de novos vidros. Cada etapa deste ciclo tem implicações ambientais significativas:

**Extração de Matérias-Primas:** As matérias-primas usadas na fabricação do vidro incluem areia, óxido de sódio (também conhecido como cal), carbonato de sódio, além de vitrificantes, fundentes, estabilizadores e outros componentes secundários que desempenham funções específicas no processo de formação do vidro. Quando não ocorre a reutilização do vidro, a mineração de areia, calcário e outros componentes do vidro pode causar degradação ambiental e perda de habitat.

**Produção:** A fabricação do vidro (figura2) é um processo intensivo em energia, nesse processo, aquece-se a mistura em torno de 1500°C, em um forno industrial. O aquecimento deve parar quando a mistura sólida se transformar em um líquido homogêneo e viscoso, que sai do forno em torno de 1000°C. É nesse momento que se inicia o banho float. Então, esse líquido viscoso então é colocado em uma câmara profunda com estanho com o objetivo de fazer com que o vidro líquido flutue até ficar plano, por conta da diferença de densidade entre esses materiais. Dentro dessa câmara, há roletes que fazem com que o líquido se movimente mais rapidamente. Quanto mais rápido, mais fino será o vidro final.

Após isso, o líquido escorre por canaletas até chegar em um conjunto de moldes, passando para a próxima etapa. Os moldes partem para uma câmara fria de recozimento, ou seja, ela resfria o molde lentamente até aproximadamente 250°C. Nela, consta sopradores que agilizam o resfriamento. O resfriamento aumenta a resistência do vidro, liberando suas tensões internas. Ou seja, faz com que dificulte a ocorrência de quebras no produto final, transformando-o em vidro temperado.

Após o resfriamento na câmara, os moldes seguem para uma esteira ao ar livre, na qual resfria os moldes até a temperatura ambiente. Dessa forma, preserva suas propriedades e evita, de novo, as quebras no processo de corte das chapas de vidro. Dessa forma, para a venda, o vidro temperado deve passar por uma inspeção, que busca separar os vidros com falhas, sejam elas na composição e presença de impurezas, surgimento de bolhas quando colocadas nos moldes, analisar a resistência e a cor.



**Figura 02** – Processo produtivo do vidro (adaptada de PROPEQ 2021)

**Distribuição e Uso:** Os vidros reprovados na produção passam por descarte, trituração e voltam para o início do processo. Os vidros aprovados podem ser cortados no tamanho desejado, transportados e vendidos. Durante a vida útil dos produtos de vidro, suas propriedades duráveis e estéticas são aproveitadas em diversas aplicações.

**Disposição:** Quando os produtos de vidro atingem o fim de sua vida útil, a disposição inadequada em aterros sanitários pode levar à ocupação de grandes espaços e potenciais riscos ambientais. Devido à sua não biodegradabilidade, a gestão adequada dos resíduos de vidro é essencial para minimizar seu impacto ambiental. A reciclagem surge como uma alternativa crucial, o vidro pode ser reciclado infinitamente sem perder suas propriedades, o que o torna um material altamente sustentável. Tendo grandes implicações na redução da geração de resíduos, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas e economizando energia. Para isso, existem diversas formas de reciclar, desde as mais simples a complexas, como o beneficiamento de caco, o fusing, sopro manual e até a rota industrial do vidro.

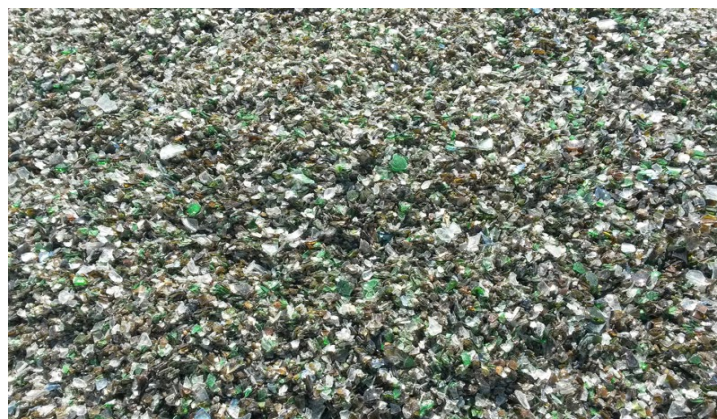


**Figura 03** – Casco (vidro em fim de vida) misturados (Cascovidro.pt sem data)

## 2.3 Geração de resíduos de vidro e impacto ambiental

A geração de resíduos de vidro é uma questão significativa para a indústria devido à natureza não biodegradável do material e à necessidade de práticas eficazes de gestão de resíduos. Este tópico aborda as principais fontes de resíduos de vidro na indústria, bem como a quantificação e caracterização desses resíduos para entender melhor sua gestão e potencial de reciclagem.

Os resíduos de vidro são gerados em várias etapas do ciclo de vida do produto, desde a produção até o consumo final. As principais fontes de rejeitos incluem a produção primária, com os rejeitos de fabricação, corte e acabamento, e o processamento secundário com os rejeitos de reciclagem e tratamento, ou seja, aqueles resíduos de vidro que não podem ser facilmente reciclados devido à complexidade de sua composição. Os rejeitos mais comuns são os provenientes do pós-consumo de embalagens, os resíduos de construção e demolição, a exemplo dos vidros arquitetónicos e de segurança, e os resíduos da indústria automobilística.

Segundo dados da Comissão Europeia, a União Europeia é o maior produtor mundial de vidro, com uma participação de mercado de cerca de um terço da produção total mundial. A indústria é conhecida pela qualidade de seus produtos, sua capacidade de inovação tecnológica e sua mão de obra qualificada. Com isso o setor produz: vidro para recipientes (60% da produção em termos de tonelagem, mas cerca de 54% em termos de valor), vidro plano (cerca de 30% em ambos os aspetos de tonelagem e valor) e o vidro doméstico, vidro especial e fibras de vidro para reforço. (*Glass - European Commission*, sem data)

Segundo a Glass for Europe, associação comercial para o setor de vidro plano da Europa, o maior mercado de vidro plano é o setor da construção civil, que representa cerca de 80% da produção, seguido de 15% representando o setor de transportes. E em média é produzido cerca de 10 milhões de toneladas de vidro por ano na União Europeia. (*Glass for Europe*, sem data)

Ainda segundo a associação Glass for Europe, a execução bem-sucedida de esquemas empresariais implementados em nível local levou a um aumento na participação média de resíduos de vidro utilizado para produzir vidro plano na Europa, de 20 para 26% entre 2010 e 2018. Apesar desse aumento substancial, existem fontes de resíduos de vidro que poderiam ser retornadas aos fornos de vidro plano, em particular de projetos de construção e demolição, dos quais apenas 5% são reciclados atualmente. (Carton, 2024)

Em Portugal, os resíduos de vidro não-recicláveis constituem um problema para a eliminação de resíduos sólidos em diferentes regiões locais. Tradicionalmente, a maioria do vidro colorido quebrado não-reciclável provém da indústria de engarrafamento. A prática atual de gestão de resíduos ainda

consiste em depositar a maioria do vidro não reciclável em aterros sanitários. (Pereira-de-Oliveira et al., 2012)

Segundo dados da FEVE – The European Container Glass Federation, com uma taxa de coleta para reciclagem de 54,4% em 2021, Portugal está abaixo da média da União Europeia, mas também é um dos Estados-Membros da UE com maior potencial para coleta e reciclagem de embalagens de vidro. É também o país europeu com a maior produção de vidro per capita, quase 4 vezes superior às suas necessidades de consumo, tornando crucial melhorar a coleta de embalagens de vidro para atender à demanda por vidro reciclado. (FEVE, 2023)

As taxas de reciclagem de vidro são mais altas em regiões com sistemas de coleta seletiva bem desenvolvidos e políticas de incentivo à reciclagem. Setores específicos, como a indústria de embalagens, tendem a ter taxas de reciclagem mais altas devido à estrutura de coleta e retorno de garrafas e frascos. Segundo a Close the Glass Loop, organização ambiental que conta com parceiros como a FEVE e plataformas nacionais, monitora a jornada em direção à conquista do objetivo de alcançar uma taxa de coleta de vidro para reciclagem de 90%. Em seus dados mais recentes mostram que a taxa média de coleta de embalagens de vidro para reciclagem na UE manteve-se estável em 80,2% em 2022.

Notavelmente, a quantidade de vidro coletada acompanhou o aumento significativo na quantidade de embalagens de vidro colocadas no mercado (+4,5%), indicando uma tendência positiva nos esforços de coleta de vidro em toda a Europa. Individualmente, com as maiores taxas de coleta para a reciclagem, a Suíça mostra uma taxa de 97% e Bélgica com uma taxa de 123%.

Por outro lado, Portugal possui uma taxa de 51% de reciclagem de embalagens de vidro, ficando apenas à frente das duas menores do grupo europeu, sendo a Hungria com 38% e a menor de todas, a Grécia com apenas 22%. (Salamon, 2024)

A gestão de resíduos de vidro enfrenta desafios como qualquer outro tipo de resíduo industrial ou de construção, a exemplo da coleta seletiva desse material, a contaminação por materiais diversos e a necessidade de tecnologias de reciclagem mais eficientes. No entanto, esse cenário também abre diversas oportunidades. A reciclagem de vidro, por exemplo, pode reduzir consideravelmente a demanda por novas matérias-primas e energia, além de diminuir o impacto ambiental. O vidro reciclado tem potencial para múltiplas aplicações, podendo ser incorporado na produção de novos produtos de vidro, ou na exploração de novos materiais de construção, como a integração no concreto e asfalto, promovendo uma economia circular. (Associação de Reciclagem dos Resíduos de Embalagens de Vidro, sem data)

## 2.4 Reintegração de resíduos industriais: Reciclagem e reutilização

O consumidor responsável é a peça central do ciclo da reciclagem. Sua colaboração, separando e descartando as embalagens de vidro no ecoponto ou vidrão, é essencial. A coleta seletiva, realizada pelos sistemas municipais ou autarquias, envolve a retirada das embalagens vazias dos pontos de coleta e seu transporte para os silos municipais. Os resíduos de vidro são então levados para uma unidade de tratamento, onde são limpos de contaminantes como rótulos, tampas e rolhas. Em seguida, esses resíduos limpos são encaminhados para a fábrica de vidro de embalagem, onde são fundidos para formar novas embalagens de vidro.



Figura 04 – Ciclo da logística reversa do vidro (Adaptado de ABRABE 2020)

Embora usemos muitos objetos de vidro, nem todos são considerados vidro de embalagem devido às suas composições químicas distintas. Os ecopontos e vidrões nas ruas são destinados exclusivamente à coleta seletiva de garrafas, frascos e boiões vazios, que se tornam resíduos após o consumo do conteúdo. Um outro desafio à reciclagem são os resíduos de vidro de embalagens frequentemente contêm contaminantes como restos de alimentos, etiquetas e outros materiais, o que pode comprometer a qualidade do vidro reciclado. Além disso, a separação do vidro por cor e tipo é essencial para garantir que o material reciclado mantenha sua qualidade. No entanto, esse processo pode ser complexo e dispendioso.

Itens como lâmpadas, copos, pratos, vidros de janela e telas de computador têm composições diferentes e não devem ser descartados nesses pontos de coleta. Portanto, para alguns tipos de vidro o seu ciclo é fechado, tornando-o eternamente reciclável, para outros tipos é requerido um processo mais complexo. Pois apesar de ser um material reciclável, uma parte significativa dos resíduos de vidro ainda é encaminhada para aterros sanitários, especialmente em locais onde a reciclagem não está adequadamente estruturada. O vidro, devido à sua densidade e volume, pode ocupar grandes áreas nos aterros, o que contribui para a rápida saturação desses espaços e eleva os custos operacionais.

Além disso, por não ser biodegradável, o vidro não se decompõe com o tempo, persistindo por centenas de anos sem sofrer alterações significativas e sem contribuir para a formação de compostos orgânicos. Em algumas situações, o vidro é misturado com outros tipos de resíduos sólidos, o que dificulta sua futura separação e reciclagem. Embora o vidro seja quimicamente inerte, sua presença pode levar à compactação do solo e modificar as características dos aterros, além de representar riscos para trabalhadores.

Segundo a Associação de Reciclagem dos Resíduos de Embalagens de Vidro de Portugal, o processo industrial para limpar vidro inclui várias etapas: o vidro coletado nos ecopontos é armazenado para garantir uma alimentação constante à unidade de processamento. Contaminantes ferrosos são removidos usando uma banda transportadora magnetizada, enquanto contaminantes grandes são retirados manualmente por operadores especializados. Contaminantes leves são eliminados por aspiração, e metais não ferrosos são removidos através de indução eletromagnética. Finalmente, contaminantes infusíveis como pedras e porcelanas são removidos com feixes de laser que acionam a ejeção por ar comprimido. Após as várias fases de escolha acima referidas, o casco encontra-se processado e pronto a ser expedido para a instalação vidreira

Esses resíduos são enviados para a indústria de vidro de embalagem, onde, diretamente ou por meio de outras empresas, são processados para se tornarem matéria-prima (caco de vidro) nos fornos de fusão. Após a fusão, o vidro é transformado em novas embalagens, que começam um novo ciclo ao ser utilizado para embalar bebidas ou alimentos (Associação de Reciclagem dos Resíduos de Embalagens de Vidro, sem data).

A reciclagem eficaz de vidro pode enfrentar barreiras significativas como: Infraestrutura insuficiente para a coleta, separação e processamento do vidro é uma das maiores dificuldades, pois muitas regiões não possuem centros de reciclagem adequados ou tecnologias avançadas. A contaminação dos resíduos por plásticos, metais e orgânicos compromete a qualidade do vidro reciclado e eleva os custos de limpeza e separação. Além disso, os altos custos de transporte, especialmente em áreas remotas, desincentivam a reciclagem. A falta de incentivos financeiros reduz a motivação de empresas e consumidores para separar e reciclar vidro, e a ausência de programas governamentais de incentivo agrava esse problema. Por fim, a falta de conscientização pública sobre os benefícios e as práticas corretas de reciclagem resulta em baixas taxas de participação. Campanhas educativas e programas de sensibilização são essenciais para superar essas barreiras.

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, a gestão de resíduos em Portugal conforme estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, atualizado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011. Este enquadramento legal, que transpõe a Diretiva 2008/98/CE, introduz conceitos como comerciante e corretor de resíduos e esclarece as operações de valorização e eliminação de resíduos. Nesta Diretiva 2008/98/CE redefiniu

a operação de valorização R12, que passou a incluir o pré-processamento de resíduos antes de submetê-los a outras operações de valorização, como desmantelamento, triagem, trituração e compactação. Este pré-tratamento não é considerado reciclagem, mas preparação para a valorização ou eliminação. Com isso, a operação de fragmentação e lavagem para obter casco de vidro de embalagem foi incluída.

A aplicação do artigo 44.º B do Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) define critérios rigorosos para a atribuição do Fim do Estatuto de Resíduo (FER), transformando resíduos em produtos, desde que cumpram regulamentações específicas. Exemplos incluem o casco de vidro e o material de borracha de pneus usados, que passam por verificações detalhadas para garantir conformidade com normas de qualidade e segurança. A clara compreensão e aplicação dessas normas promovem a valorização sustentável e eficiente dos materiais, minimizando os impactos ambientais. A clarificação de conceitos e operações contribui para uma gestão mais eficaz e regulada dos resíduos em Portugal, promovendo práticas sustentáveis e uma economia circular.

Embora exista a tentativa de promoção da valorização sustentável dos resíduos, Portugal está a falhar nas metas de reciclagem. A Associação dos Industriais de Vidro de Embalagem (AIVE) destacou a necessidade urgente de mudanças para atingir as metas de reciclagem de vidro em Portugal. Sandra Santos, presidente da AIVE, enfatizou a importância de reforçar a coleta pelos prestadores de serviço municipais, especialmente adaptando-se à sazonalidade e desenvolvendo soluções específicas para o canal *Horeca*, que inclui hotéis, restaurantes e cafetarias.

Em entrevista para o Jornal de Negócios de Portugal, a Associação aponta falhas do Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagem (SIGRE) como um todo - desde o consumidor até às entidades gestoras, passando pelos municípios - pelo facto de o vidro não estar a conseguir cumprir as respetivas metas de reciclagem. Em 2025 as metas impostas por Bruxelas passarão a ser de 70% de vidro reciclado, subindo para 75% em 2030. De acordo com os últimos dados oficiais do Eurostat, referentes a 2021, esta taxa foi de apenas 55% em Portugal.

"Apesar do esforço e inovação do sector, muito pouco foi feito pelo SIGRE para que este material de embalagem consiga cumprir as metas de reciclagem. Os números continuam muito aquém do expectável no que diz respeito aos resultados da reciclagem do vidro, muitas vezes apontado como o pior desempenho do SIGRE, uma tendência dos últimos 10 anos", refere a AIVE. *(Portugal reciclou menos 6.200 toneladas de vidro em 2023. Indústria pede medidas urgentes, sem data)*

Em suma, a reciclagem de vidro é um processo complexo, mas vital, que oferece benefícios ambientais e económicos significativos. Superar as barreiras à reciclagem eficaz requer investimentos em infraestrutura, incentivos económicos e esforços contínuos de conscientização pública.

### **3. Argamassas cimentícias com adição de pó de vidro**

#### **3.1 Metodologias e discussões**

O componente mais caro e que consome mais energia em argamassas convencionais é o cimento. Segundo Miranda e Selmo citado por Oliveira, o cimento é o material ligante nas argamassas e betões, que promove a coesão dos agregados na mistura fresca, fornece resistência mecânica e reduz a permeabilidade à água (Oliveira et al., 2015). O vidro tem características físicas e químicas adequadas para substituição parcial em matrizes cimentícias. A presença do alto teor de sílica amorfa no pó de vidro por reagir com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento proporciona uma reatividade pozolânica nesse material (Radwan et al., 2021). E para que um material seja considerado pozolânico, é necessário ter um alto teor de sílica amorfa e uma alta superfície específica, características que são encontradas no vidro. (Oliveira et al., 2015)

Quando utilizados em argamassas, os materiais pozolânicos permitem a redução do teor de cimento, gerando a formação de compostos hidráulicos, contribuindo assim para um aumento significativo na resistência mecânica. No entanto, devido à sua composição majoritariamente de sílica amorfa, além de menores percentuais de sódio e cálcio, o vidro tem uma composição que favorece o desenvolvimento de reações pozolânicas (Oliveira et al., 2015). A construção civil procura por materiais pozolânicos alternativos e as adições são partes fundamentais dos materiais cimentícios, já que contribuem para a redução do consumo de cimento que por sua vez resulta na redução dos custos de produção e do consumo de energia. (Jochem et al., 2021)

O uso de vidro reciclado nos materiais cimentícios, seja como substituto parcial do cimento, seja como substituto de agregados finos, pode ser vantajoso tanto ambientalmente quanto, às vezes, economicamente, pois transforma grandes quantidades de resíduos em produtos de valor agregado e reduz a necessidade de transporte, fornecendo uma fonte de material local. (Corinaldesi et al., 2016)

Estudos anteriores investigaram a viabilidade de usar os cacos de vidro reciclado para substituir agregados finos naturais (areia) em blocos de concreto ou argamassas de cimento. As conclusões indicaram que essa opção de reciclagem do vidro é econômica e atrativa para materiais de construção. O Waste Glass Cullet (WGC) foi utilizado na produção de argamassas com substituição de areia para reduzir a retração por secagem e a absorção de água, melhorar as propriedades no estado fresco devido à sua superfície lisa, aumentar a durabilidade com sua alta resistência à abrasão e ácidos, fortalecer a resistência à compressão e o módulo de elasticidade após exposição

a altas temperaturas, e reforçar a atividade fotocatalítica devido às suas propriedades de transmissão de luz. (Lu et al., 2017a)

Geralmente, existem duas principais formas de aplicação de resíduos de vidro em argamassas cimentícias: uma é utilizando o resíduo de caco de vidro (Waste Glass Cullet - WGC) como agregados, e a outra é utilizando o pó de vidro reciclado (Waste Glass Powder - WGP) como material cimentício suplementar. (Lu et al., 2017b) Esta distinção entre a função dos resíduos de vidro em materiais cimentícios é definida exclusivamente pelo tamanho das partículas. Para ativar a reatividade pozolânica, os resíduos de vidro devem ser moídos a um tamanho inferior a 150 µm. (Oliveira et al., 2015)

De acordo com Terro citado por Jochem, partículas finas de vidro (menos de 150 µm) geralmente têm uma atividade pozolânica benéfica para o concreto, enquanto partículas mais grossas são prejudiciais devido à reação álcali-sílica. Embora utilizar partículas finas seja uma solução eficaz para substituir parcialmente o cimento, moer o vidro até a finura necessária (quase equivalente à do cimento) é um processo custoso, exigindo várias horas de tratamento. (Jochem et al., 2021)

De acordo com Pereira de oliveira et al. Em termos de substituição do cimento, 30% do cimento pode ser substituído por resíduos de vidro moídos com tamanho de 45-75 µm em argamassa ou concreto, sem causar efeitos prejudiciais devido à expansividade induzida pela reação álcali-sílica. A reação pozolânica é maior quando se faz uso de partículas de vidros entre 45 e 75 µm, sendo que o aumento desta reatividade foi maior para a substituição de 30% de pó de vidro. (Pereira-de-Oliveira et al., 2012) Por outro lado, Segundo Khmiriet et al., ao utilizarem partículas de vidro maiores que 100 µm, observaram que elas não são efetivas para ativar a pozolanicidade, devido à expansão da reação álcali-sílica (RAS). (Khmiri et al., 2013)

A reação álcali-sílica (ASR) é uma reação química que ocorre no concreto devido à interação entre os álcalis presentes no cimento (principalmente o óxido de sódio,  $\text{Na}_2\text{O}$ , e o óxido de potássio,  $\text{K}_2\text{O}$ ) e certos tipos de sílica reativa contida nos agregados (pedras, areia). Essa reação pode levar à formação de um gel expansivo que, quando absorve água, aumenta de volume, provocando fissuras e danos estruturais no concreto. Os álcalis provenientes do cimento Portland e outras fontes aumentam a concentração de íons hidroxila, intensificando a reação. Para controlar a ASR, é comum o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs), que ajudam a reduzir a disponibilidade de álcalis e, consequentemente, mitigam os efeitos da reação. (Thomas, 2011)

Para Aliabdo et al. O uso de pó de vidro como aditivo de cimento, em até 15%, melhora a resistência à compressão, a resistência à flexão e a relação de vazios do concreto com resistência de 33 MPa. Esse aumento é de 4,7%, 14,6% e 16,8% para o concreto modificado com 5%, 10% e 15% de adição

de pó de vidro, respetivamente, em comparação com a mistura de controle. Para concreto com resistência de 45 MPa, essas propriedades mecânicas e físicas são melhoradas com até 25% de adição de pó de vidro. A resistência à flexão do concreto modificado com pó de vidro é cerca de 9 a 13% da resistência à compressão do concreto. (Aliabdo et al., 2016)

Khan, Saha e Sarker citado por Morais et al. concluíram que, quando as partículas de vidro nas argamassas são inferiores a 45µm e o teor de substituição é de até 30%, há uma melhora significativa na resistência à compressão. Para concretos com pó de vidro, onde 80% das partículas têm tamanho abaixo de 45µm e o teor de substituição de cimento varia entre 0-20%, foram observadas melhores respostas em termos de pozolanicidade, resistência mecânica e durabilidade (Morais, A. et al., 2022). Um aumento na resistência à compressão em torno de 38% foi observado para as argamassas com 30% de substituição de cimento por pó de vidro, apresentando tamanho de 75 µm. (Parghi & Shahria Alam, 2016)

Segundo Khan et al., verificou-se que as propriedades da argamassa ou concreto com cimento misturado com pó de vidro dependem principalmente de vários fatores, como o tamanho das partículas, o nível de substituição, a cor e o tipo do vidro, bem como a idade e a temperatura de cura. O uso de pó de vidro melhorou significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa e do concreto quando o tamanho das partículas do pó de vidro era inferior a 45 µm e a taxa de substituição do cimento estava entre 10-40%. (Li et al., 2022)

Pesquisadores analisaram o impacto da cor e do tipo de vidro na resistência das misturas cimentícias. Os autores mostrados por Khan et al. descobriram que a argamassa com 10% de pó de vidro branco e verde aumentou significativamente a resistência à compressão, enquanto o vidro âmbar teve um efeito menor (Dyer e Dhir). Karamberi e Moutsatsou observaram que o vidro transparente era mais eficaz que o vidro âmbar. A reatividade pozolânica do vidro âmbar foi alta, mas sua eficácia estrutural foi menor. Mirzahosseini e Riding relataram que o vidro verde aumentou a resistência devido à alta dissolução de silício e alumínio. Bignozzi et al. explicaram que a taxa de dissolução do vidro varia com a composição, afetando a reação álcali-sílica. AL-Zubaid encontrou que o pó de vidro neon proporcionou maior resistência em comparação com o vidro verde devido a sua maior quantidade de SiO<sub>2</sub> e CaO. (Khan et al., 2020)

Islam, Rahman e Kazi estudaram a influência do pó de vidro na trabalhabilidade e na resistência à compressão da argamassa e do concreto, usando apenas pó de vidro transparente. Pode-se ver pela maioria dos estudos que o tipo e a cor do vidro podem ter uma influência significativa no desenvolvimento da resistência da argamassa e do concreto misturados, devido à variação da composição química ou à natureza da reação de diferentes cores e tipos de pó de vidro. (Islam et al., 2017)

Em relação ao tempo de cura, Pan citado por Khan et al. mostrou que as misturas cimentícias ganham resistência principalmente pela hidratação do cimento, enquanto as misturas com pó de vidro ganham resistência tanto pela hidratação quanto pelas reações pozolânicas. A atividade pozolânica do pó de vidro é baixa nos primeiros dias, portanto, as misturas com vidro mostraram menor resistência nas idades iniciais. (Khan et al., 2020)

Foi relatado que a absorção de água do concreto e da argamassa diminuiu significativamente com o aumento do teor de pó de vidro devido à maior reação pozolânica. Parghi e Alam citado por Khan descobriram que a argamassa contendo 30% de pó de vidro apresentou cerca de 17,4% menos absorção de água do que a argamassa de controle aos 28 dias. Da mesma forma, Nassar e Soroushian citado por Khan relataram que o concreto contendo 20% de pó de vidro apresentou cerca de 13,1% menos absorção de água em comparação com o concreto de referência aos 56 dias. (Khan et al., 2020)

Khan em sua revisão de literatura conclui que, em relação à absorção de água e as propriedades mecânicas, as amostras misturadas com agregado fino de vidro apresentaram significativamente menor absorção de água, retração por secagem, resistências a cloretos e sulfatos do que as amostras de controle, com até 100% de substituição da areia natural. A principal preocupação com o uso de agregado fino de vidro é a reação álcali-sílica, que pode ser minimizada: usando vários tipos de materiais suplementares ao cimento, como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa, ou reduzindo os tamanhos das partículas de agregado de vidro para menos de 1 mm.

Também foi observado que o agregado fino de vidro pode ser utilizado em até 100% do agregado fino na argamassa e no concreto, sem efeitos negativos nas propriedades mecânicas e de durabilidade, quando o tamanho das partículas é inferior a 1 mm. O uso combinado de vidro como material cimentício suplementar (SCM) e agregado fino reduziu as propriedades mecânicas das composições, mas melhorou algumas propriedades de durabilidade. (Khan et al., 2020) Em contrapartida, Liu et al. relataram que a argamassa com 50% de agregado fino de vidro com tamanhos de partículas de 0,15 a 5 mm e 10% de pó de vidro com tamanhos de partículas de 14,94 µm apresentou cerca de 5 - 6% a mais de resistência à compressão do que a argamassa de controle aos 7 - 90 dias. (S. Liu et al., 2016)

Da mesma forma, Lu et al. relataram que a argamassa com 20% de pó de vidro com tamanhos de partículas de 47,9 µm e 100% de agregado fino de vidro com tamanhos de partículas de 0,15–5 mm apresentou cerca de 4% a mais de resistência à compressão, enquanto a argamassa com 50% de pó de vidro e 100% de agregado fino de vidro apresentou cerca de 29% a mais de resistência à flexão do que a argamassa de referência (100% cimento + 100% agregado fino de vidro). (Lu et al., 2017a)

As propriedades mecânicas de argamassa e concreto misturados com vidro reduziram de 10-20% em comparação com o concreto e argamassa de controle quando tanto o cimento quanto o agregado fino natural foram parcialmente substituídos pelo uso de pó de vidro e agregado fino de vidro, respectivamente. No entanto, o uso combinado de vidro residual como ligante suplementar e agregado fino melhorou significativamente as propriedades de durabilidade do concreto e argamassa.

É importante ponderar também sobre o processamento destes materiais suplementares ao cimento. A trituração do vidro residual requer alta energia e longo tempo, uma vez que o vidro residual bruto ou recebido do processo de reciclagem ainda não está adequado para uso como parte do ligante ou agregado fino em composições de cimento Portland. Estes resíduos vindos da reciclagem possuem grande quantidade de impurezas ou a ampla gama de tamanhos e formas, bordas afiadas e partículas de vidro mais grosseiras para participar da reação pozolânica, necessitando um processamento mais cuidadoso.



**Figura 05** – Partículas de resíduo de vidro com diferentes tamanho e formas após processo de moagem e crivagem (imagem do autor)

Segundo Oliveira (2015), a produção destas argamassas com adição de vidro permitiria reutilizar o vidro descartado como resíduo de construção e demolição, cerca de 0,5% por peso, de acordo com Rodrigues et al (2013), ou como resíduo urbano sólido, cerca de 0,5% por peso, de acordo com Russo (2009), bem como os resíduos de vidro das indústrias automotiva e de vidros. (Oliveira et al., 2015).

Em contrapartida, segundo Islam et al., a adição de vidro pode reduzir o custo de produção de cimento em até 14%. Além disso, a produção de cada seis toneladas de concreto com pó de vidro

pode resultar na redução de uma tonelada de emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da produção de cimento, contribuindo significativamente para a reduzir a emissão de gases (Islam et al., 2017). O uso desses resíduos diminuiria substancialmente o consumo de cimento na indústria de argamassas pré-misturadas. Isso se soma a outras possibilidades de uso de resíduos de vidro em materiais cimentícios, como o concreto, demonstrando ainda mais o alto potencial de reciclagem deste material.

### 3.2 Síntese da literatura

Como pode ser observado anteriormente, diversos autores estão trabalhando com o resíduo de pó de vidro como substituinte parcial do cimento ou de agregados, é possível verificar uma convergência em suas conclusões: a reatividade pozolânica do pó de vidro residual depende principalmente de sua finura, e mesmo variando suas percentagens entre 5% e 30%, além de métodos de experimentação, é possível utilizar o pó de vidro para substituição do cimento desde que estes possuam baixa granulometria, idealmente menores que 75µm. Além disso, a cor do vidro também afeta significativamente a reatividade devido à variação na composição química entre os diferentes tipos de vidro residual. A utilização de vidro triturado com tamanhos de partículas menores que 1 mm como agregado fino em argamassa e concreto mostrou resistências à compressão, flexão e tração comparáveis ou superiores às da argamassa e concreto normais, com até 50% de substituição da areia natural.

E segundo a revisão de Khan et al., o tamanho das partículas de vidro e proporções ideais tem um impacto nas propriedades mecânicas do concreto e argamassas. Os principais pontos a considerar são: 1. Tamanho menor, maior resistência: Partículas de vidro menores (menos de 45 µm) melhoram a resistência à compressão, flexão e tração do concreto devido à maior reatividade pozolânica. 2. Reatividade pozolânica: Partículas finas de vidro reagem mais rapidamente com o hidróxido de cálcio, formando gel de silicato de cálcio (C-S-H), que aumenta a resistência do concreto. 3. Densidade da microestrutura: Vidro moído fino preenche melhor os poros, resultando em uma microestrutura mais densa e menos permeável. 4. Limite de substituição: A substituição de cimento por vidro moído fino é mais eficaz até cerca de 30%, além destes os benefícios podem diminuir. 5. Vidro em pó: A substituição do cimento por vidro em pó melhora as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto quando o tamanho das partículas é menor que 45 µm e a taxa de substituição é de 10-40%. 6. Vidro como agregado fino: O vidro pode substituir até 100% da areia natural em argamassa e concreto sem efeitos negativos nas propriedades mecânicas e de durabilidade, desde que o tamanho das partículas seja menor que 1 mm. 7. Combinação de vidro em pó e agregado fino: O uso combinado reduz as propriedades mecânicas, mas melhora algumas propriedades de durabilidade. (Khan et al., 2020)

Trabalhos de pesquisa disponíveis relacionados à utilização de vidro como substituinte e agregado fino ao mesmo tempo em sistemas cimentícios são muito limitados. Portanto, mais pesquisas são necessárias nesta área para entender melhor os mecanismos. Porém, a utilização de vidro residual como substituto do cimento ou agregado fino natural, na proporção correta atinge os padrões pedidos pelas normas requeridas para a indústria da construção e será uma ótima opção para a construção sustentável, assim diminuindo os impactos ambientais que esses materiais ocasionam atualmente no planeta. A tabela abaixo apresenta uma síntese dos vários estudos conduzidos por pesquisadores utilizando o resíduo fino de vidro e pó como material complementar do cimento ou substituto do agregado fino natural.

| Autores                           | Material substituído | Material usado                                | Porcentagem de substituição    | Granulometria (µm) | Tempo de cura                | Força Compressiva                                                         | Absorção de água                                                                                           | Resultados                                                       |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Li et al. (2022)                  | Cimento              | vidro sodo-calcico transparente               | até 25%                        | 20 a 44 µm         | 7, 28 e 90 dias              | aumento de resistência com até 20% de substituição                        | aumento da absorção com o aumento da substituição e diminuição da partícula                                | atividade pozolânica e melhores resultados a 20% de substituição |
| Morais et al. (2022)              | Cimento              | vidro sodo-calcico transparente               | até 25%                        | < 45 µm a < 75 µm  | 28 e 91 dias                 | aumento de resistência de 30% com até 20% de substituição                 | aumento na absorção de água com o aumento do teor de pó de vidro                                           | atividade pozolânica, melhores resultados a 20% de substituição  |
| Jochem et al. (2021)              | Cimento              | vidro sodo-calcico transparente               | até 20%                        | 12 a 20 µm         | 7, 28 e 90 dias              | nao melhorou a resistência mecânica                                       | —                                                                                                          | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Khan et al. (2020)                | Cimento              | vidro sodo-calcico transparente               | até 30%                        | < 45 µm            | 7, 28 e 90 dias              | melhora a resistência à compressão até 30% de substituição                | 13-18% menor absorção de água                                                                              | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Khan et al. (2020)                | Areia                | vidro                                         | até 50%                        | < 1mm              | 7, 28 e 90 dias              | melhora a resistência à compressão até 50% de substituição                | —                                                                                                          | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Lu et al. (2017)                  | Areia e Cimento      | vidro sodo-calcico verde                      | areia até 100% cimento até 20% | < 50 µm            | 7, 28 e 90 dias              | melhora a resistência e supera a argamassa-teste após os 90 dias          | —                                                                                                          | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Pan et al. (2017)                 | Cimento              | vidro nao especificado                        | até 20%                        | < 45 µm a < 60 µm  | 3, 7 e 28 dias               | perda da força compressiva sob altas temperaturas                         | —                                                                                                          | atividade pozolânica aumenta com o tempo                         |
| Islam et al. (2017)               | Cimento              | vidro sodo-calcico colorido e transparente    | até 25%                        | < 75 µm            | 7, 28, 90, 56, 180, 365 dias | aumento de resistência com 20% de substituição a 90 dias                  | —                                                                                                          | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Parghi e Alam (2016)              | Cimento              | vidro sodo-calcico verde                      | até 25%                        | 25 a < 75 µm       | 7, 28, 56 e 90 dias          | aumento de resistência em amostras com 25%                                | reduz significativamente a absorção de água                                                                | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Aliabdo et al. (2016)             | Cimento              | vidro sodo-calcico                            | até 25%                        | < 75 µm            | 7, 28 e 56 dias              | A adição de 15% de pó de vidro aumentou a resistência à compressão em 16% | A absorção de água do concreto aumentou com o aumento do nível de substituição do cimento por pó de vidro. | atividade pozolânica comprovada                                  |
| Oliveira et al. (2015)            | Cimento              | vidro sodo-calcico float                      | até 20%                        | 0.149 mm           | 28 dias                      | aumento da resistência mecânica                                           | A absorção de água por capilaridade diminuiu                                                               | atividade pozolânica significante                                |
| Pereira de Oliveira et al. (2012) | Cimento              | vidro sodo-calcico verde, transparente, âmbar | até 30%                        | 45 µm a 75 µm      | 7, 28 e 90 dias              | reduz a resistência à compressão ao redor de 20%                          | —                                                                                                          | atividade pozolânica comprovada                                  |

**Tabela 01** – Tabela síntese de estudos de pó e resíduo de vidro

## 4. Impressão 3D de argamassas cimentícias

Após a investigação de literatura sobre argamassas cimentícias com adição de vidro em sua composição e suas aplicações potenciais, esta seção se dedicará a uma síntese da tecnologia de impressão 3D, também denominada manufatura aditiva (MA). O objetivo é explorar suas técnicas, aplicações e limitações. A ênfase será dada à impressão de materiais cimentícios, conhecida como 3D Concrete Printing (3DCP), em virtude da natureza do material em questão a ser desenvolvido e posteriormente impresso.

As tecnologias de manufatura aditiva (MA), conhecidas também como impressão 3D (3DP), têm se expandido rapidamente em vários setores industriais, como o aeroespacial, automotivo, médico, arquitetura, artes e design, alimentação e construção. À medida que passam das fases de visualização e prototipagem para a substituição funcional de peças, surgem novas possibilidades de design. Embora a MA tenha diversas aplicações, sua utilização na construção civil ainda não resultou em um produto amplamente disponível para todos e comercialmente viável, apesar dos esforços e exemplos bem-sucedidos que serão mostrados no capítulo seguinte. No entanto, o tema tem atraído o interesse de muitos pesquisadores nas últimas décadas. A integração da MA em construções de grande escala enfrenta desafios e riscos significativos, o que faz com que seu avanço no mercado ocorra de forma lenta, com poucos experimentos em grande escala documentados na literatura (Al Rashid et al., 2020).

Os materiais cimentícios, como o concreto ou betão, são amplamente utilizados em todo o mundo devido a características como resistência à compressão e ao fogo, versatilidade antes da cura e, principalmente, o baixo custo, resultado da abundância dos seus componentes. No entanto, essa ampla utilização muitas vezes leva a um uso descuidado, resultando em grandes desperdícios de material (Teixeira, 2018). Além disso, o processo de fabricação do próprio cimento, como exposto no capítulo anterior, envolve a queima do calcário para produzir clínquer, gerando significativas emissões de CO<sub>2</sub>. O desperdício de materiais também é exacerbado pela necessidade de fôrmas temporárias para a concretagem e cofragem, o que aumenta os custos e o tempo de construção.

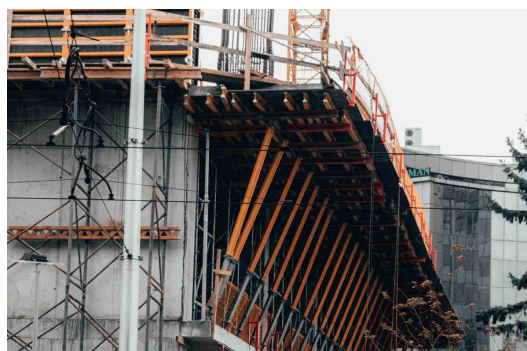


**Figura 06** – Cofragem (portaldosandaiques.com 2024)

Os processos de fabrico e construção influenciam diretamente a forma com que engenheiros, arquitetos e designers pensam as construções e os projetos, pois num modo tradicional de construção utilizando o betão, a produção destas formas complexas resulta em altos custos. Isso torna muitos designs arquitetônicos arrojados inviáveis devido ao elevado custo de materiais, tempo de fabricação, necessidade de mão de obra qualificada, e reforço estrutural necessário para melhorar a resistência à tração dos materiais cimentícios. Além disso, o transporte de elementos estruturais complexos, frequentemente pré-fabricados. (Teixeira, 2018)

É neste ponto em que a procura por formas alternativas de construção para conseguir geometrias mais complexas surgem. A impressão 3D com materiais cimentícios aceleraram a fabricação com concreto, tentando minimizar desperdícios e as limitações das formas nas técnicas tradicionais ao eliminar a necessidade de cofragem. Oferecendo uma abordagem mais sustentável e maior liberdade de design. Ao mesmo tempo, esta abordagem se torna mais sustentável ao reutilizar resíduos nas argamassas cimentícias, com o uso vidro neste estudo, para a diminuição do uso do cimento.

A este tipo de tecnologia de impressão com materiais cimentícios pode atribuir-se vários nomes, LSMA (Large Scale Additive Manufacturing), AMoC (Additive Manufacturing of Concrete) ou 3DCMP (3D Cementitious Material Printing) (Teixeira, 2018) Para estes processos, como qualquer tecnologia de construção, é necessário cumprir várias especificações, desde os materiais para extrusão até o design da geometria do produto final. Isso inclui garantir a fluidez adequada do material para a impressora 3D e a precisão no tempo de cura para suportar as camadas seguintes. Tudo isso tem levado a uma intensa produção de pesquisas para otimizar a inserção do material, sua composição e os métodos de extrusão escolhidos. (Al Rashid et al., 2020)

## 4.1 Tecnologias de Impressão 3D de argamassas cimentícias

Até o momento, os processos utilizados em aplicações para o ambiente construído e em grande escala incluem processos baseados em extrusão (Material Extrusion) e a tecnologia de impressão do material em grão (Binder Jetting). Nesta seção, são apresentados os processos que promovem a extrusão de materiais cimentícios e similares, juntamente com uma breve descrição dos materiais utilizados e os resultados que podem ser obtidos.

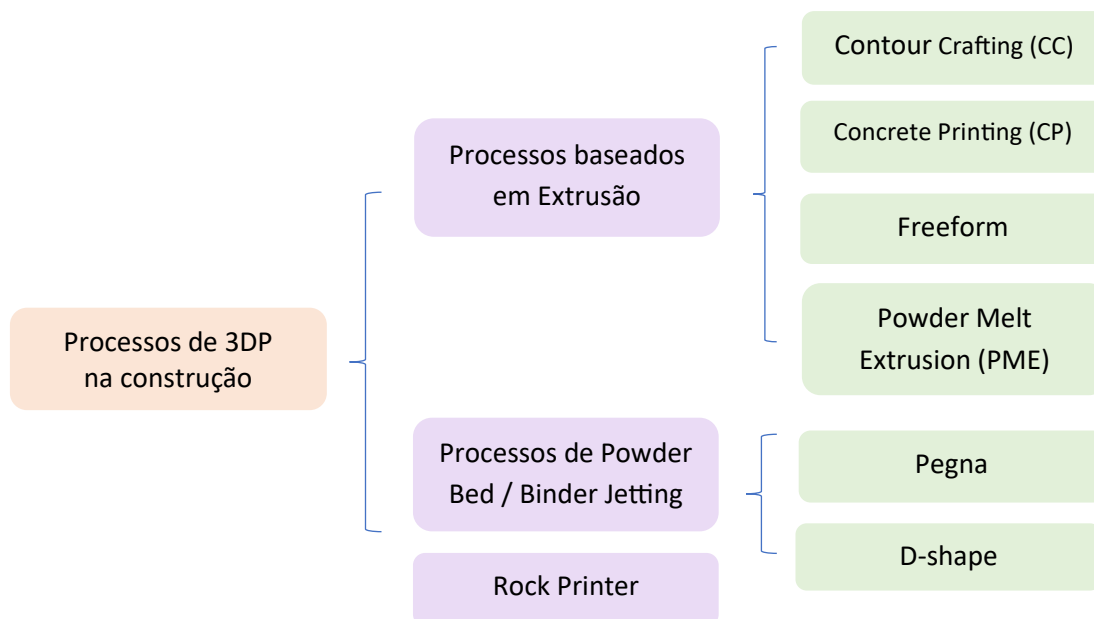


**Figura 07** – Processos de Manufatura Aditiva na Construção (Adaptado de (Al Rashid et al., 2020)

Esta primeira técnica, o *Binder Jetting*, semelhante ao processo de powder bed fusion, utiliza um material de granulometria fina, como areia e vidro, colocado por camadas e mantido unido por um ligante pulverizado, mas em vez de utilizar uma fonte de calor, uma cabeça de impressão é usada para aplicar um aglutinante em pontos onde a fusão do material é necessária. Após a conclusão de uma camada, uma nova camada de pó é adicionada para a camada subsequente (Lv et al., 2019). É necessário um processo de pós cura para melhor adesão das camadas, assim como eliminar o pó excedente e os suportes. Esse processo é frágil por via da adesão das partículas feita apenas pelo ligante e possui uma complexidade de produção que aumenta seu valor de fabricação. (Mercado Rivera & Rojas Arciniegas, 2020)

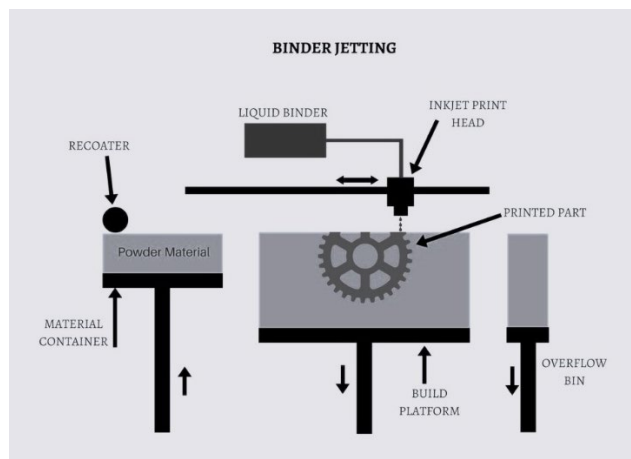


**Figura 08** – Diagrama da Técnica de Binder Jetting (Manufactur3Dmag.com)

Baseada na tecnologia Binder Jetting, o primeiro conceito de manufatura aditiva em grande escala surgiu em 1997, criado por Joseph Pagna. Esse método utiliza três materiais: cimento, areia e água. O processo envolve a deposição de uma camada de areia com 1 mm de espessura, seguida pela aplicação de cimento nas áreas que formarão a peça. Em seguida, toda a camada é vaporizada com água, iniciando a hidratação do cimento, que endurece e consolida os grãos de areia, atuando como ligante. Esse processo é repetido camada por camada. (Pagna, 1997)

Já o D-shape, outro processo de impressão 3D baseado no Binder Jetting, foi criado em 2007 pelo engenheiro civil Enrico Dini. Esse processo utiliza uma impressora que consolida o calcário dolomítico triturado, em uma pedra sólida, ao utilizar um aglutinante natural patenteado, que foi testado com sucesso em agregados de mármore e rocha vulcânica. A impressora opera em uma mesa de 4x4 metros. Em cada camada, o material é depositado na espessura desejada, compactado e, em seguida, pulverizado com o aglutinante nas áreas correspondentes à seção transversal da peça a ser impressa (Dini, 2024)

No caso da técnica de impressão 3D Material Extrusion, é feita a extrusão de filamentos de material e a sua deposição em camadas. Estão incluídas as técnicas de Fused Filament Fabrication (FFF), Fused Deposition Modeling (FDM) e Dough Deposition Extrusion (DDE). Nestas, o material é empurrado através de uma cabeça extrusora com diâmetro definido e, sob pressão, é liberado em forma de filamento. O software controla a formação do objeto, construindo-o camada por camada até ser concluído. (Mercado Rivera & Rojas Arciniegas, 2020)

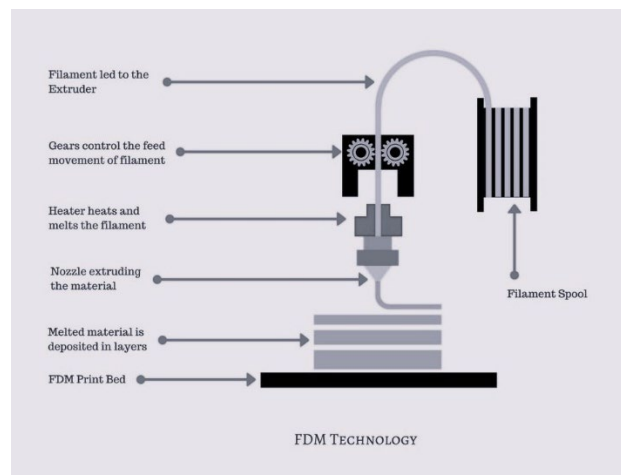


**Figura 09** – Diagrama da Técnica de Extrusão FDM (Manufatur3Dmag.com)

Após apresentar o contexto dos tipos de manufatura aditiva aplicados ao ambiente construído, será dado foco principalmente os processos baseados em extrusão, com ênfase no processo de 3D Concrete Printing (3DCP), que será o método utilizado. Este tem sido amplamente investigado por pesquisadores e pela indústria da construção. A impressão 3D de concreto (3DCP), como a manufatura aditiva, aplica o cimento, em camadas sucessivas até completar a construção do projeto desenvolvido. (Tay et al., 2019)

A impressão de concreto foi desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Loughborough para a manufatura aditiva de edifícios e componentes, e é semelhante a outro processo de impressão a extrusão, o *Contour Crafting* (CC). Embora os princípios de funcionamento do CC e da impressão de concreto sejam os mesmos, a impressão de concreto oferece uma maior precisão dimensional, no entanto, resulta em um acabamento de superfície mais áspero e grosseiro devido à ausência de desempenadeiras laterais (Al Rashid et al., 2020). Os processos de impressão de concreto proporcionaram avanços revolucionários na automação do setor de construção, mas esses processos apresentam limitações em termos de utilização de materiais e flexibilidade. (Craveiro et al., 2019)

## 4.2 Parâmetros de uma argamassa cimentícia imprimível

A qualidade de impressão e a integridade estrutural de componentes impressos em 3D dependem de vários parâmetros interligados. As propriedades mecânicas dos elementos de concreto impressos em 3D dependem de vários fatores, incluindo a taxa de deposição do material, as características do material, a velocidade de impressão, a orientação da impressão e do material (Al Rashid et al., 2020). A impressão 3D é influenciada também pelo tamanho e forma do bocal, a velocidade de impressão, a distância do bocal à plataforma e o intervalo entre camadas. Bocais de formatos diferentes afetam a

impressão de maneiras variadas; por exemplo, bocais retangulares proporcionam maior resistência do que os circulares, que são mais adequados para construções complexas. A escolha do bocal deve considerar o tamanho dos agregados na argamassa para evitar entupimentos. A altura e a velocidade de impressão também impactam a resistência entre camadas: maiores alturas e velocidades podem reduzir essa resistência, tornando as camadas instáveis. Além disso, o intervalo entre camadas é crucial para a adesão: um intervalo adequado previne deformações e colapsos, enquanto intervalos maiores podem diminuir a resistência de adesão, e intervalos menores podem aumentá-la. (Lyu et al., 2021).

A argamassa é o material mais amplamente utilizado na impressão 3D para aplicações na construção, composta por cimento Portland juntamente com alguns componentes para melhorar a trabalhabilidade, durabilidade, retenção de água e o tempo de cura da mistura. O processo geral de impressão 3D de materiais cimentícios pode ser dividido em três fases: preparação da mistura, transporte da mistura ao sistema de extrusão da impressora e, finalmente, a extrusão (Al Rashid et al., 2020). Durante a fase de colocação da mistura na impressora, espera-se que esta apresente boa fluidez para garantir a extrusão; no entanto, o material precisa se estabilizar rapidamente após a extrusão, para suportar as cargas das camadas subsequentes. (Zhang et al., 2019)

O progresso nos processos de impressão de concreto e argamassas também levou pesquisadores a definir as propriedades dos materiais de extrusão. A trabalhabilidade, fluidez, a capacidade de extrusão, capacidade de construção, bombeabilidade e o tempo de abertura são definidos como os parâmetros de impressão. (Al Rashid et al., 2020)



**Figura 10** – Parâmetros para processos de impressão 3D (Adaptado de Al Rashid et al.)

A tabela a seguir explica os parâmetros definidos por vários autores para uma boa impressão, estes serviram de guia para os testes feitos no plano experimental mais a frente.

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Trabalhabilidade</b>         | Definida como a capacidade de um material extrudado (que garante a adesão e resistência adequadas) de construir uma estrutura sem falhas. (1)                                                                                                     |
| <b>Capacidade de Construção</b> | A capacidade de construção, ou construtibilidade, define a facilidade de fabricação de uma estrutura ou quão eficientemente uma estrutura pode ser produzida. (2)                                                                                 |
| <b>Fluidez</b>                  | A fluidez é avaliada medindo o diâmetro de espalhamento da argamassa, que é um parâmetro quantitativo que representa a trabalhabilidade das argamassas. (3)                                                                                       |
| <b>Capacidade de extrusão</b>   | A extrudabilidade da mistura é a capacidade de passagem dela. O sistema de entrega no processo de impressão de concreto. (4)                                                                                                                      |
| <b>Bombeamento</b>              | Reflete a facilidade de transportar o material da bomba para o bico de extrusão. (5)                                                                                                                                                              |
| <b>Retenção da forma</b>        | O material deve conservar sua forma após a extrusão, apresentando baixo índice de abaixamento e alta tensão de escoamento. (6)                                                                                                                    |
| <b>Tempo de Abertura</b>        | É o tempo durante o qual o material precisa fluir continuamente pelo sistema de impressão, preservando as propriedades essenciais para o processo. (7)                                                                                            |
| <b>Adesão entre camadas</b>     | A adesão entre camadas em impressões 3D depende das propriedades do material e do tempo entre as impressões. Uma maior tixotropia e maior intervalo entre camadas reduzem a resistência, uma menor distância entre camadas melhora a ligação. (8) |

**Tabela 02** – Parâmetros de impressão para o material

- (1) (Zhang et al., 2019)
- (2) (Le et al., 2012)
- (3) (Zhang et al., 2019)
- (4) (Le et al., 2012)
- (5) (Panda et al., 2019)
- (6) (Panda et al., 2019)
- (7) (Robayo-Salazar et al., 2023)
- (8) (Panda et al., 2019)

É importante salientar que ambos os métodos de construção, tradicional e impressão 3D, são válidos a depender dos objetivos da construção. A impressão 3D na construção apresenta diversas vantagens e desvantagens em comparação com os métodos tradicionais. Em resumo do que foi exposto, se apresentam em:

A impressão 3D utiliza apenas a quantidade necessária de material para construir a estrutura, resultando em menos desperdício em comparação com os métodos tradicionais. A tecnologia permite uma construção altamente precisa, minimizando erros humanos e aumentando a eficiência do processo. A impressão 3D possibilita a criação de formas complexas e arquitetonicamente arrojadas que seriam difíceis ou caras de realizar com técnicas convencionais. Projetos que poderiam levar meses com métodos tradicionais podem ser concluídos em dias ou semanas, acelerando o tempo de construção. Ao eliminar a necessidade de cofragens ou de moldes e reduzir o desperdício de material e a mão de obra, a impressão 3D pode resultar em custos mais baixos, especialmente para projetos personalizados ou complexos. A impressão 3D pode usar também materiais reciclados ou sustentáveis, e sua eficiência de uso de material contribui para um menor impacto ambiental.

Embora esteja em desenvolvimento, a impressão 3D ainda enfrenta desafios para a construção de grandes estruturas ou edifícios complexos em uma única etapa. O investimento inicial em equipamentos de impressão 3D e materiais especializados pode ser alto, o que pode ser um obstáculo para pequenas empresas ou projetos. Atualmente, a impressão 3D é mais eficaz com certos tipos de materiais, como cimento e alguns polímeros, mas menos versátil com uma ampla gama de materiais de construção tradicionais. A operação e manutenção de impressoras 3D, assim como a preparação dos modelos digitais, entendimento de softwares, requerem habilidades técnicas avançadas que nem sempre estão disponíveis no setor tradicional de construção, ou seja, requerem uma mão de obra qualificada. A impressão 3D na construção ainda é relativamente nova e pode enfrentar desafios em termos de regulamentação e aceitação nas normas de construção, limitando sua adoção em larga escala.

## 5. Impressão 3D de argamassas cimentícias com adição do vidro

### 5.1 Metodologias e discussões

Embora exista uma vasta literatura sobre a experimentação com o uso de pó de vidro como material suplementar ao cimento e substituto de agregados naturais e seus bons resultados para aplicações, como por exemplo, a utilização prática na construção das pontes Darwin, que será mostrado mais adiante na pesquisa de mercado. A aplicação desses materiais utilizando vidro na impressão 3D ainda é pouco explorada, com escassa produção bibliográfica disponível sobre o tema.

Apesar das potencialidades da tecnologia existe a necessidade de melhorar sua sustentabilidade. Uma das soluções poderá passar pelo desenvolvimento de materiais alternativos para substituir o cimento Portland comum (OPC) e a areia natural de rios, o que ajuda a diminuir tanto as emissões de dióxido de carbono quanto a exploração de recursos naturais valiosos. E o segundo método é otimizar a fase de design do modelo a ser impresso, otimizando a distribuição dos materiais e reduzindo o uso total de material na etapa de impressão (J. Liu et al., 2022). A aplicação dos dois temas em paralelo requer mais estudo e investigação.

No estudo de J. Liu et al. é investigado o uso de vidro reciclado como substituto parcial da areia natural em concreto impresso em 3D (3DCP). São analisadas as propriedades flexurais do concreto, substituindo 50% da areia por diferentes graduações e tamanhos de vidro reciclado e realizados testes de flexão para avaliar a resistência e o comportamento das fissuras. Também são examinadas as microestruturas do concreto. O objetivo principal é entender como a adição de vidro afeta as propriedades mecânicas e a propagação de fissuras em diferentes direções de impressão (J. Liu et al., 2022). Em seus resultados, expõe que a adição de vidro diminuiu a resistência flexural em 8% a 20% quando o vão era paralelo à direção de impressão, mas aumentou a resistência em 25% a 33% quando perpendicular, concluindo que a resistência e o desenvolvimento de trincas foram influenciados pela presença e morfologia das partículas de vidro.

Ting et al. investigou os efeitos do uso de agregados de vidro reciclado como agregados finos na impressão 3D de concreto. Comparou o concreto com areia natural e concreto com diferentes proporções de vidro reciclado (25%, 50%, 75% e 100%). Concluindo que o aumento do vidro reciclado reduz a resistência à compressão e a resistência de ligação entre camadas. Também conclui que capacidade de construção não mostrou variação significativa com diferentes níveis de vidro reciclado, mas a densidade fresca do concreto diminuiu. (Ting et al., 2021)

Em relação à influência da granulometria e quantidade de vidro reciclado nas propriedades da argamassa, Ting et al. procura garantir que o vidro reciclado se comporte de forma semelhante à areia natural de rio, a distribuição das partículas de vidro reciclado foi ajustada para imitar a da areia. Além disso, para evitar problemas como segregação e entupimento do bocal durante a impressão 3D de concreto, foram removidas as partículas maiores que 2 mm de ambos os tipos de agregados. Para assegurar que as propriedades do material não fossem afetadas pelas diferenças na granulometria dos agregados, o tamanho das partículas de vidro reciclado foi regulado para corresponder o mais próximo possível ao da areia natural de rio.

Ting et al. conclui que as misturas de concreto com cacos de vidro reciclado são viáveis para aplicações em impressão 3D de concreto (C3DP). Em sua análise ambiental é revelado que a utilização de cacos de vidro reciclado como substituto de agregados finos em aplicações 3DCP pode potencialmente reduzir a demanda anual por areia de construção em 1,16%, oferecendo uma vantagem em relação aos materiais tradicionais de C3DP do ponto de vista ambiental e de sustentabilidade. Embora o uso de vidro reciclado forneça uma alternativa mais ecológica à areia de construção, o processo de moagem do vidro reciclado é altamente intensivo em energia. Reiterando que a granulometria dos agregados de vidro reciclado em C3DP pode ser mais investigada em trabalhos futuros para reduzir a necessidade de agregados de vidro mais finos. (Ting et al., 2021)

## 6. Design e sustentabilidade

O conceito de desenvolvimento sustentável, como definido no Relatório Brundtland de 1987, busca atender às necessidades atuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem as suas próprias. Entre as várias abordagens de sustentabilidade, destaca-se uma visão pragmática que enfatiza os aspectos econômicos e tecnológicos. Essa abordagem sugere que o mercado pode liderar a transição para o desenvolvimento sustentável através da adoção de "tecnologias limpas", do controle do crescimento populacional e da promoção de práticas de produção e consumo mais ecológicas. Além disso, essa perspectiva defende que o crescimento econômico pode ser compatível com a preservação ambiental, permitindo que o sistema capitalista se adapte às novas demandas ambientais, transformando-as em oportunidades para aumentar a competitividade e eficiência produtiva. Dessa forma, seria possível aumentar a produção enquanto se reduz o uso de recursos naturais e a geração de resíduos. (Lima, 2003)

### 6.1 Economia circular

Segundo o plano de ação de economia circular da comissão europeia, esta se insere no desenvolvimento sustentável ao promover um modelo econômico que prioriza a reutilização, a reciclagem e prolongamento do ciclo de vida dos produtos, reduzindo assim a extração de recursos naturais e a geração de resíduos. Em contraste com o modelo linear de "extrair, produzir e descartar", a economia circular busca fechar o ciclo de materiais, minimizando o impacto ambiental e promovendo a eficiência no uso de recursos. Ao integrar práticas de design sustentável, gestão de resíduos e inovação tecnológica, a economia circular contribui para um desenvolvimento econômico que respeita os limites ecológicos e garante que as necessidades presentes sejam atendidas sem comprometer as futuras gerações, alinhando-se diretamente com os princípios do desenvolvimento sustentável. (*Circular Economy Action Plan - European Commission*, sem data)

O conceito de economia circular foi desenvolvido e refinado a partir de diversas correntes de pensamento, como design regenerativo, economia de desempenho, cradle to cradle, ecologia industrial e biomimética. A definição amplamente aceita de economia circular foi estabelecida pela Ellen MacArthur Foundation, que descreve a economia circular como um sistema econômico industrial planejado para ser restaurativo e regenerativo por design. Este modelo visa depender de fontes de energia renováveis, minimizar e eliminar o uso de substâncias tóxicas e erradicar a geração de resíduos por meio de um planejamento criterioso e consciente. (Ellen MacArthur Foundation, 2013)

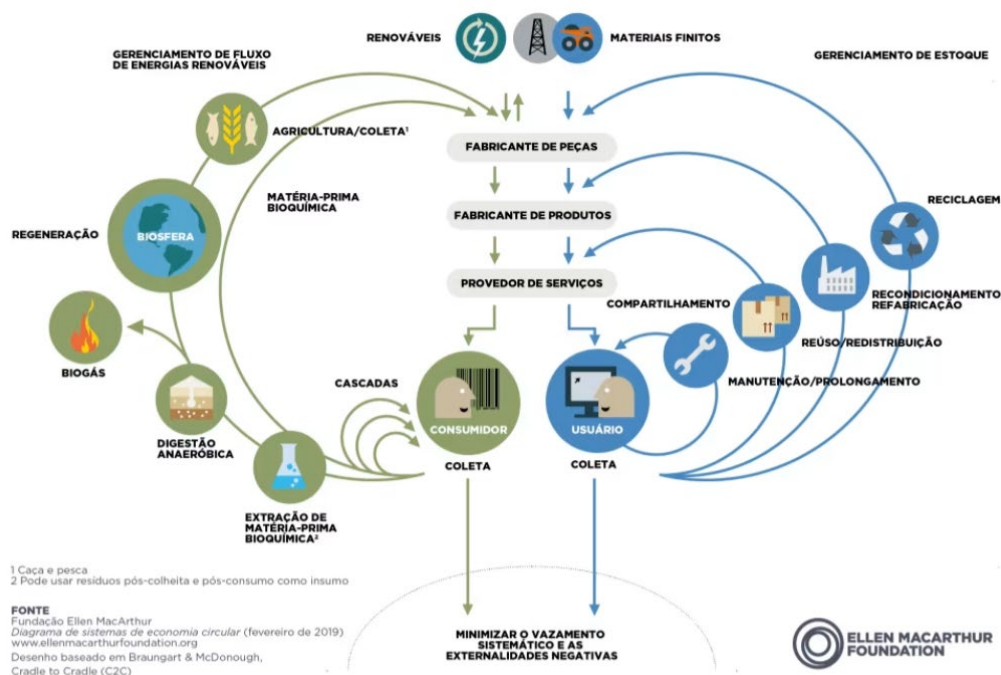


Figura 11 – Diagrama de Economia Circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015)

Os três princípios principais da economia circular, segundo a Ellen MacArthur Foundation, são:

1. Eliminar o desperdício e a poluição: Este princípio busca desenhar produtos, processos e sistemas de forma que minimizem a produção de resíduos e poluição desde o início. A ideia é evitar a criação de resíduos e poluentes ao invés de tentar gerenciá-los após sua geração, princípio que guia este trabalho através da escolha pela impressão 3D, por exemplo.
2. Manter os produtos e materiais em uso: A economia circular promove a extensão da vida útil dos produtos e a maximização do valor dos materiais. Isso pode ser feito por meio de estratégias como manutenção, reparo, remanufatura e reutilização. A ideia é que os produtos e materiais continuem a circular na economia por mais tempo, reduzindo a necessidade de novos recursos, a reutilização dos resíduos de vidro descartados na fabricação de novos materiais e impressão de produtos promovem este princípio.
3. Regenerar sistemas naturais: Este princípio enfatiza a importância de restaurar e regenerar os sistemas naturais, em vez de simplesmente minimizar o impacto ambiental. Isso pode incluir práticas como o uso de materiais biodegradáveis, a promoção de agricultura regenerativa e o desenvolvimento de sistemas que contribuem positivamente para o meio ambiente, como por exemplo, a transição do sistema linear para o circular.

## 6.2 O papel do designer na sustentabilidade

O conceito de design para a sustentabilidade é amplamente explorado por vários autores e especialistas em design, estes oferecem uma ampla perspectiva, passando de abordagens focadas no produto para sistemas mais complexos que integram aspectos sociais e técnicos. Entre alguns exemplos que se tornaram icônicos para o campo do design são a obra do arquiteto William McDonough e o químico Michael Braungart, conhecidos por seu trabalho fundamental no livro *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, ao propor uma abordagem em que produtos e processos são vistos como parte de ciclos naturais, minimizando resíduos e reutilizando materiais. (McDonough, 2002) Manzini e Vezzoli discutem como o design para a sustentabilidade pode ser compreendido como uma abordagem estratégica. Isso envolve a adoção de um conjunto de práticas por designers e empresas. A essência dessa abordagem está na capacidade do designer de incorporar estratégias sustentáveis desde o início do processo de criação, assegurando que os produtos sejam desenvolvidos para reduzir impactos ambientais adversos e trazer benefícios tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente. Assim, o design sustentável visa assegurar a sustentabilidade do produto durante todo o seu ciclo de vida (Vezzoli & Manzini, 2008). Janine Benyus, em *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, explora como o design pode se inspirar nos processos e estruturas naturais para criar soluções sustentáveis, eficientes e inovadoras. (Biomimicry Institute, 2024) Victor Papanek, em *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*, promove um design mais ético e voltado para a sustentabilidade, enfatizando a importância de resolver problemas reais e atender às necessidades humanas de forma sustentável. (Papanek, 1984)

## 7. Pesquisa de mercado

De modo a compreender o que tem sido produzido atualmente, a pesquisa de mercado realizada foca na análise das aplicações emergentes e inovadoras da impressão 3D, desenvolvidas pela academia ou comercialmente, que utilizam argamassas cimentícias juntamente com variados resíduos e materiais com ênfase no desenvolvimento sustentável e na eficiência construtiva. O objetivo principal foi identificar projetos pioneiros que exemplificam o uso dessas tecnologias variadas de impressão ou de uso de argamassas cimentícias, destacando os benefícios ambientais, econômicos e estruturais obtidos por meio da exploração do potencial dos resíduos, com um foco maior no vidro, e a incorporação de materiais reciclados na composição das misturas utilizadas para impressão 3D. A seguir, é apresentada uma síntese dos projetos estudados, evidenciando suas características principais, aplicações, onde estão sendo realizadas e os resultados alcançados.

### 7.1 O uso do cimento e pó de vidro reciclado em grandes estruturas

#### Provencher Roy Architects

Provencher Roy Architects Darwin Bridges

Canadá | 2021

Aqui é exemplificado o uso do pó de vidro em argamassas cimentícias para a produção de betão na construção de grandes estruturas, como as pontes Darwin situadas em Nuns' Island em Montréal. As pontes gêmeas trazem uma nova abordagem arquitetônica ao fazer uso de materiais sustentáveis e de origem local. Alinhadas com o objetivo da Ville de Montréal de impulsionar a transição ecológica e se posicionar como um exemplo de mobilidade sustentável na América do Norte, as pontes substituem antigas estruturas que já haviam cumprido sua vida útil. O projeto também ampliou a faixa central da rodovia, criando uma forma arqueada para as pontes, e adicionou um muro de contenção com plantas na passarela, inspirado em um jardim secreto.



Figura 12 e 13 – Pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021)

A reconstrução das pontes Darwin utiliza vidro reciclado de origem local, tornando-se a primeira no mundo a usar e realmente aplicar concreto com pó de vidro, um novo material que incorpora vidro reciclado e finamente moído. Esse tipo de concreto, também conhecido como pozolana de vidro moído (Ground Glass Pozzolan), substitui 10% do ligante ternário necessário pelo pó de vidro reciclado. Ao usar o GGP, é economizado aproximadamente 40.000 kg de concreto e utilizados um total de quase 40.000 kg de vidro reciclado – o equivalente a 70.000 garrafas de vinho. Essa inovação patenteada, e totalmente desenvolvida em Quebec, é resultado de 17 anos de pesquisa conduzida pela Universidade de Sherbrooke e pela Ville de Montréal. Composto por GGP, a vida útil das pontes Darwin se estenderá por mais de 125 anos, em comparação com 75 anos para uma estrutura convencional de concreto. As pontes apresentam uma nova materialidade sustentável, fazendo uma estreia mundial no desenvolvimento urbano. Ganhou o primeiro lugar na categoria Infraestrutura – nos Prêmios de Construção em Concreto, pelo Instituto Americano de Concreto. Assim, a utilização do pó de vidro oferece uma solução ecologicamente mais eficiente, durável e inovadora no contexto urbano e na utilização nas grandes estruturas (Provencher Roy, 2024).



Figura 14 e 15 – Passarelas e jardim sob as pontes Darwin em Montreal (Stéphane Brügger 2021)

Apesar do exemplo anterior, a investigação revela uma literatura e uma exploração de mercado ainda restritas no campo da impressão 3D de argamassas utilizando pó de vidro reciclado. A seguir é ilustrado um exemplo de impressão e pesquisa realizada pela Nanyang Technological University em Singapura.

#### **NTU**

Recycled glass in concrete 3D printing

Singapura | 2014

Pesquisadores da NTU desenvolveram um método para usar vidro reciclado na impressão 3D de concreto, promovendo uma construção mais sustentável. Pois apenas 13% das 74.000 toneladas de resíduos de vidro gerados em Singapura foram recicladas em 2021. Ao mesmo tempo, a pesquisa é

fundamentada devido ao crescimento da urbanização e desenvolvimento de infraestruturas, em que o mundo enfrenta uma escassez de areia, sendo considerada um dos maiores desafios de sustentabilidade do século XXI pelos cientistas climáticos. O vidro, como exposto no capítulo anterior, é composto por sílica, componente principal da areia - um recurso em declínio. E é nesta substituição da areia presente no concreto que a pesquisa é focada (NTU, 2022).

Os pesquisadores da NTU desenvolveram uma mistura de concreto com partículas de vidro reciclado em diferentes granulometrias. De acordo com testes de laboratório, o concreto apresenta excelente resistência mecânica e capacidade de construção. Usando essa mistura, eles imprimiram em 3D um banco de concreto. Os pesquisadores observaram que o concreto não se deformou nem colapsou antes de curar e tinha fluidez suficiente para passar facilmente pelo bico da impressora. O estudo prevê a colaboração com parceiros para otimizar a tecnologia e imprimir em 3D estruturas de grande escala (NTU, 2022).



**Figura 16** – Bloco impresso em 3D (NTU Singapore 2022)

## **7.2 A Impressão 3D de Vidro**

Exemplos que demonstram a viabilidade da produção de peças de vidro por meio da impressão 3D, detalhando os processos envolvidos e como a academia está abordando essas tecnologias pioneiras e técnicas inovadoras.

**MIT**

G3DP - Mediated Matter

Estados Unidos | 2014

Neste exemplo pioneiro há o uso do próprio vidro como filamento de impressão, o grupo de pesquisa Mediated Matter do MIT desenvolveu uma técnica chamada G3DP (Glass 3D Printing), onde eles conseguiram imprimir vidro em 3D. A pesquisa do MIT abriu novas possibilidades na criação de formas complexas e personalizadas em vidro, com aplicações que variam de arquitetura a objetos decorativos e arte. O G3DP, primeiro de seu tipo, é uma plataforma de manufatura aditiva projetada para imprimir vidro óptico transparente. A possibilidade de ajuste permitida pela variação geométrica e óptica, impulsionada pela forma, transparência e variação de cor, pode influenciar, limitar ou controlar a transmissão, reflexão e refração da luz, trazendo implicações significativas para todas as aplicações relacionadas ao vidro (MIT Mediated Matter, 2014).



Figura 17 – Protótipo com iluminação (Mediated Matter 2014)

A plataforma é baseada em um conceito de câmara dupla aquecida. A câmara superior atua como um cartucho de forno, enquanto a câmara inferior serve para recozer as estruturas. O cartucho de forno opera a aproximadamente 1900°F (ou 1037,78°C) e pode conter material suficiente para construir um único componente arquitetônico. O material fundido é canalizado através de um bico de alumina-zircônia-sílica. Este projeto sintetiza tecnologias modernas de impressão 3D com ferramentas e técnicas tradicionais do vidro, produzindo estruturas de vidro inovadoras com inúmeras aplicações potenciais, porém é importante salientar que é requerido impressoras que atinjam elevadas temperaturas devido à temperatura de fusão do vidro (MIT Mediated Matter, 2014).

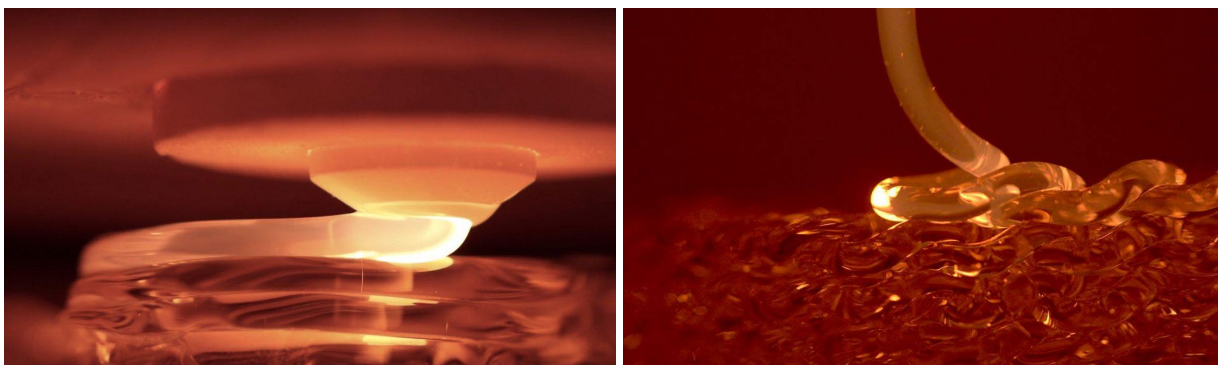


Figura 18 e 19 – Processo de impressão do filamento de vidro (Mediated Matter 2014)

Neste exemplo é mostrado como os pesquisadores da ETH usaram um processo de impressão 3D para produzir objetos de vidro complexos e altamente porosos. E como base para isso foi utilizada uma resina especial que pode ser curada com luz UV. Como mostrado no exemplo anterior, produzir objetos de vidro por meio de impressão 3D é uma tarefa desafiadora. Poucos grupos de pesquisadores ao redor do mundo têm tentado criar vidro utilizando métodos aditivos. Alguns têm fabricado objetos a partir de vidro fundido, mas isso apresenta a desvantagem de exigir temperaturas extremamente elevadas, impressoras e equipamentos resistentes ao calor. Outros pesquisadores utilizam partículas cerâmicas em pó, que podem ser impressas à temperatura ambiente e depois sinterizadas para formar vidro; entretanto, os objetos produzidos dessa forma tendem a ser menos complexos.

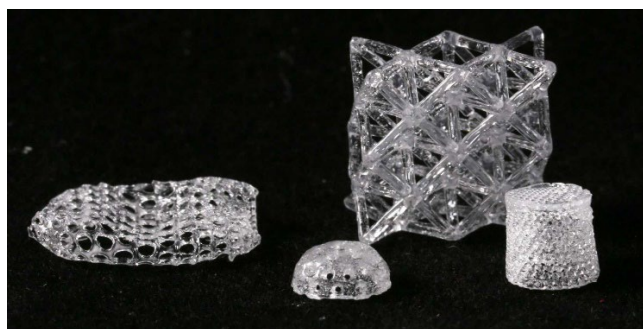


**Figura 20** – Vários objetos vítreos criados com uma impressora 3d (ETH Zurich 2019)

Os pesquisadores da ETH Zurich utilizaram uma nova técnica para produzir objetos de vidro complexos por meio de impressão 3D. O método é baseado na estereolitografia, uma das primeiras técnicas de impressão 3D desenvolvidas durante a década de 1980. Os pesquisadores do grupo de Complex Materials liderado pelo professor da ETH André Studart, desenvolveram um compósito de sílica foto curável especial que contém um plástico e moléculas orgânicas às quais precursores de vidro estão ligados.

Essa técnica utiliza resina que pode ser processada com tecnologia Digital Light Processing, onde a resina endurece ao ser irradiada com padrões de luz UV. Isso permite a construção de objetos camada por camada, com controle do tamanho dos poros e microestrutura, misturando diferentes componentes à resina. Após a impressão, os objetos são aquecidos a diferentes temperaturas para eliminar a estrutura polimérica e densificar a cerâmica em vidro, resultando em objetos transparentes e duros. A figura abaixo mostra a peça em bruto (à esquerda) e é aquecida a 600 graus para eliminar a estrutura plástica. Em uma segunda etapa de aquecimento, a cerca de 1000°C para densificar a estrutura cerâmica em vidro (ETH ZÜRICH, 2019).

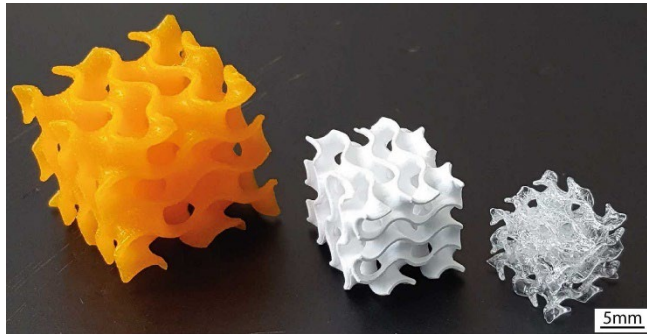


Figura 21 – Fases de endurecimento da resina e transformação em vidro (ETH Zurich 2019)

### 7.3 A impressão 3D de elementos arquitetônicos

#### Zaha Hadid + ETH Zürich + incremental3D

Striatus

Itália | 2021

Neste exemplo de colaboração entre empresas e academia, Zaha Hadid Architects Computation and Design Group (ZHA CODE), em parceria com a ETH Zurich (Block Research Group), em colaboração com a especialista em impressão 3d de concreto incremental3D e a fabricante de materiais Holcim construíram em Veneza a Striatus, uma ponte de concreto impressa em 3D que se destaca por ser autoportante e montada sem argamassa. Com 16 metros de comprimento, a ponte é composta por 53 blocos ocas, cada um formado por 500 camadas de concreto impresso (*Incremental3d*, 2021).



Figura 22 e 23 – Ponte Striatus em Veneza (incremental3D 2021)

Diferente dos métodos convencionais de impressão 3D que utilizam extrusão em camadas horizontais, a ponte foi impressa com um único braço robótico de seis eixos, criando camadas não coplanares em seus 53 blocos. A impressão de todos os blocos levou 84 horas, com cada bloco

demandando entre uma e duas horas. A construção completa da ponte, que incluiu a fundação, montagem, e a instalação de escadas e do deck, levou um total de 35 dias.



**Figura 24** – Ponte em Striatum em Veneza (incremental3D 2021)

Esta estrutura arqueada solicitada à compressão por influência da gravidade, utiliza essa carga para manter sua forma. Os elementos impressos em 3D em forma de cunha, conhecidos como voussoirs, são dispostos para formar arcos e abóbadas. Essa configuração permite que a ponte seja montada e desmontada facilmente, possibilitando sua transferência para outros locais (*Zaha Hadid Architects Creates Unreinforced 3D-Printed Concrete Bridge at Venice, 2021*).

#### **TU Eindhoven**

Bridge project

Holanda | 2021

Neste projeto desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Eindhoven em colaboração com o designer Michiel van der Kley foi construída na cidade de Nijmegen, na Holanda, a ponte de concreto impressa em 3D para bicicletas mais longa do mundo, com 29 metros de comprimento. O projeto, caracterizado por formas arredondadas e onduladas, pôde ser desenvolvido sem as restrições tradicionais do material ou dos processos convencionais, como as formas de concreto, graças aos avanços na tecnologia de impressão 3D (*TU Eindhoven, 2021*).

A ponte foi impressa camada por camada e em partes na fábrica de impressão de concreto da Saint Gobain Weber Beamix e realizada pelo grupo de construção BAM usando um modelo paramétrico para considerar a variação de peso. Em teoria, além de ser rápida e flexível, a impressão 3D de concreto oferece sustentabilidade, usando menos material, além de propor maior flexibilidade e espaço para designs personalizados e tem o potencial de se tornar uma metodologia amplamente utilizada na construção de pontes e casas (*TU Eindhoven, 2021*).



**Figura 25 e 26** – Ponte em Nijmegen (Michiel van der Kley 2021)

A seguir são apresentadas e consideradas referências visuais significativas, apesar destes não serem produzidos com argamassas cimentícias, serão utilizadas para explorar a aplicação dos ladrilhos em fachadas e a diversidade de formas que podem ser impressas. A viabilidade do uso de ladrilhos cerâmicos sem cor, ou brancos, também será analisada como fonte de inspiração para o desenvolvimento do produto abordado nesta dissertação.

## **STUDIO RAP**

Ceramic House

Holanda | 2014

A Ceramic House, projetada pelo Studio RAP, reinterpreta as qualidades decorativas das cerâmicas vidradas em Amsterdã, combinando elementos tradicionais e contemporâneos, ao utilizar processos de fabricação digital de ponta. Utilizando algoritmos de design digital criados por eles, o estúdio manteve a estrutura tripartida da fachada original, garantindo uma integração harmoniosa com os edifícios históricos ao redor.



**Figura 27 e 28** – Fachada da loja em Amsterdam (Studio RAP 2014)

Cada ladrilho cerâmico personalizado foi impresso em 3D por braços robóticos e depois vidrados artesanalmente. A fachada é adornada com camadas detalhadas inspiradas em têxteis, como dobras e fios entrelaçados, que criam um efeito orgânico e dinâmico, revelando novos detalhes à medida que o observador se move. Um efeito que foi possível graças à técnica de impressão. O resultado é uma boutique de luxo que se destaca, ao mesmo tempo em que respeita o ambiente histórico (Donaldson, 2023).



**Figura 29 e 30** – Processo de impressão dos ladrilhos e diversidade de peças impressas (Studio RAP 2014)

No nível da rua, a fachada apresenta grandes azulejos cerâmicos impressos em 3D, esmaltados em branco perolado com um leve toque de amarelo, criando um visual com mais detalhes. Nos andares superiores, a fachada é adornada com tijolos impressos em 3D, esmaltados em três tons de vermelho e organizados com ornamentação abstrata que se dissolve conforme sobe. Esses tijolos são encaixados em cassetes de aço inoxidável cortados a laser, mantendo a referência aos acabamentos originais (Donaldson, 2023).



**Figura 31** – Detalhes do efeito orgânico e dinâmico da fachada (Studio RAP 2014)

## STUDIO RAP

New Delft Blue

Holanda | 2019

Aqui neste projeto do mesmo Studio RAP é ilustrada a utilização de tijolos impressos individualmente para a composição de um painel arquitetônico que cobre um portal dentro de um edifício. Ao combinar mais uma vez impressão 3D em argila e design computacional, posteriormente sendo esmaltado e vidrado artesanalmente no renomado azul Delft.

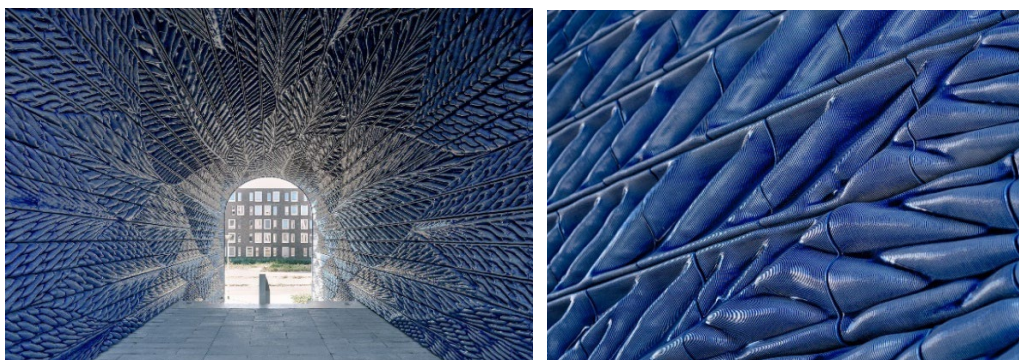


Figura 32 e 33 – Detalhes do efeito orgânico e dinâmico do painel (Studio RAP 2019)

No total, 3.000 azulejos únicos foram impressos em 3D por braços robóticos e dispostos em um padrão definido por um algoritmo criado pelo Studio RAP. Estes azulejos únicos, medindo cerca de 40 centímetros por 30 centímetros, foram impressos em 3D pelo Studio RAP e coloridos com um esmalte azul transparente. Juntamente com a natureza e os padrões da porcelana Delft Blue, as formas dos azulejos foram determinadas pelas limitações da impressão 3D. Diferente do exemplo anterior, estes têm ligeiramente uma maior escala, mas possuem as mesmas restrições de fabricação que a tecnologia de impressão 3D impõe como inclinação máxima, largura, altura e profundidade, comportamento do material, encolhimento e estrutura de suporte interna – com todos esses fatores os azulejos foram formados e foi feito um artesanato digital (Ravenscroft, 2023).

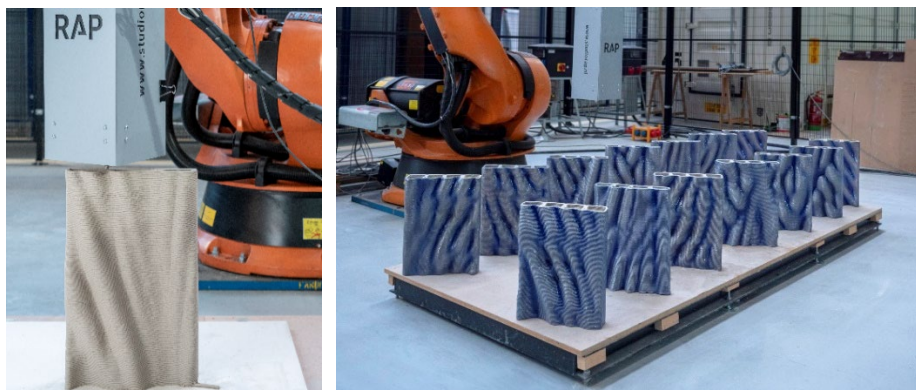


Figura 34 e 35 – Impressão das peças e peças em estado final (Studio RAP 2019)

## ICON

Impressora Phoenix e variados projetos  
Estados Unidos | 2024

Depois de pontes e elementos de fachada, utilizando a impressão 3d de argamassas, é relevante mencionar o trabalho realizado pela ICON, uma empresa de tecnologia baseada no Texas, que lidera o avanço na construção de casas e outras estruturas utilizando impressão 3D. Eles desenvolveram o *Lavacrete*, um concreto inovador que, mesmo sendo impresso rapidamente, mantém sua forma e oferece alta resistência à compressão, superando os padrões exigidos em testes estruturais.

A impressora Vulcan da ICON pode construir residências de até 278,7 m<sup>2</sup> sem necessidade de realocação durante o processo. Recentemente, a empresa apresentou a Phoenix, uma avançada impressora 3D montada em um braço robótico, que permite a construção de estruturas de vários andares e totalmente fechadas, como fundações e telhados, utilizando uma mistura de concreto de baixo carbono (Dreith, 2024).



Figura 36 e 37 – Impressora Phoenix e braço robótico (ICON 2024)

Com 21 metros de altura, a Phoenix, que atua como um sistema semelhante a um guindaste, e pode imprimir estruturas de até 8,2 metros, mais altas do que a atual impressora Vulcan, distribui a mistura cimentícia Lavacrete através de um bico estabilizado por giroscópios. Atualmente, a ICON está desenvolvendo um protótipo com um telhado em forma de cúpula em sua sede em Austin, demonstrando o potencial da tecnologia para edificações complexas (Dreith, 2024).

Assim como outras tecnologias de impressão 3D na construção, ela aplica camada sobre camada da mistura, criando lentamente paredes que são suportadas por aço, mas que não necessitam das formas extensas, geralmente de madeira, que caracterizam a construção em concreto tradicional.



**Figura 38** – Impressora Phoenix em uso (ICON 2024)

Além de criar comunidades inteiras de casas para venda, a ICON se dedica a projetos de habitação para pessoas sem-teto e ao desenvolvimento de infraestruturas para ambientes extremos, como na Lua e em Marte, em colaboração com a NASA. A empresa lançou o Codex, um repositório com mais de 60 designs "prontos para imprimir", incluindo coleções desenvolvidas pelo estúdio dinamarquês BIG. Esse repositório será expandido continuamente, oferecendo aos desenvolvedores uma variedade crescente de designs para construção. A seguir, imagens dos projetos mencionados (ICON, 2024).



**Figura 39 e 40** – Projeto Community First Village de casas construídas para pessoas sem-teto (ICON 2020) e Render do Hotel El Cosmico a ser construído com o estúdio BIG (ICON 2023)

#### **7.4 A impressão 3D com impressoras WASP**

A WASP (World's Advanced Saving Project) é uma empresa italiana pioneira em impressoras 3D de grande escala, especializando-se em aplicações arquitetônicas e de construção. Utilizando tecnologia inovadora, a WASP cria estruturas e elementos arquitetônicos com materiais naturais e sustentáveis, como cimento, argila, terra e palha. Seus projetos incluem desde habitações de baixo custo até estruturas complexas, combinando técnicas digitais avançadas com arquitetura sustentável.

Em 2015, a empresa lança a impressora 3D, naquele momento, mais alta do mundo, com 12 metros de altura e 7 metros de largura, montada com braços modulares de 6 metros. Todos os componentes da máquina têm um comprimento máximo de 3 metros, permitindo que sejam facilmente carregados em um trailer e transportados (WASP, 2024).

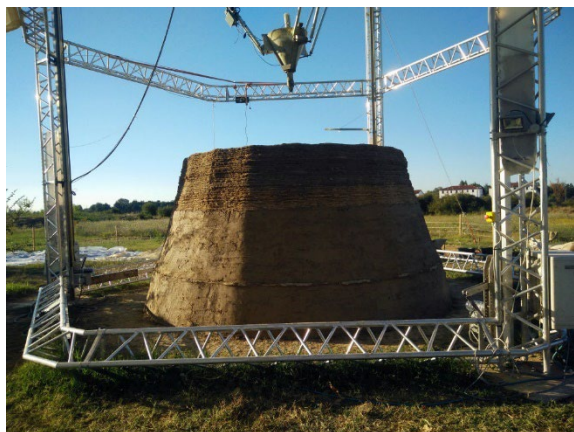


**Figura 41 e 42** – BIG Delta WASP 12MT em processo de impressão e estrutura de 12 metros da impressora (WASP 2015)

Em 2018, a WASP lançou a Crane WASP, a impressora 3D infinita, um sistema colaborativo de impressão 3D capaz de construir casas. A impressora é modular e reinterpreta os guindastes de construção tradicionais sob a perspectiva da fabricação digital. Composta por uma unidade principal de impressão que pode ser montada em várias configurações, dependendo da área de impressão e das dimensões da estrutura arquitetônica a ser criada, a Crane WASP possui uma área de impressão de 8,2 metros de diâmetro e 3 metros de altura por módulo (WASP, 2022).

A empresa é conhecida pelos seus modelos de impressora Delta, e serão apresentados exemplos de projetos realizados por esta empresa ou pela gama de impressoras Delta, uma vez que uma impressora Delta da WASP, de menor escala, foi empregada na impressão dos objetos deste presente estudo.

#### **WASP + Mario Cucinella Architects**

TECLA

Italia | 2021

O estúdio Mario Cucinella Architects, em parceria com a WASP, desenvolveu o Tecla – Technology and Clay, um protótipo de habitação sustentável impresso em 3D com argila. A casa é composta por dois volumes em forma de cúpula, com paredes externas nervuradas formadas por 350 camadas de argila impressa. Nesta abordagem é utilizada argila de um leito de rio local e foi impressa em Massa Lombarda, Itália. O design das camadas ondulantes oferece tanto estabilidade estrutural quanto isolamento térmico.

O protótipo Tecla foi construído usando a impressora 3D WASP Crane modular com dois braços sincronizados, cada um com uma área de impressão de 50 metros quadrados, permitindo a impressão simultânea de módulos. Esse processo permite a construção dos módulos habitacionais em cerca de 200 horas, com um consumo médio de seis quilowatts de energia e minimizando significativamente os resíduos de construção (James, 2021).



**Figura 43 e 44** – Protótipo TECLA sendo impresso pela impressora WASP Crane (Italdron 2021)

Pela primeira vez, dois braços de impressão foram sincronizados como parte de uma construção, graças ao software próprio da WASP capaz de otimizar os movimentos, evitar colisões e garantir a operação simultânea. Portanto, o projeto TECLA pode ser sintetizado em: 200 horas de impressão, 7.000 códigos de máquina (G-code), 350 camadas de 12 mm, 150 km de extrusão, 60 metros cúbicos de materiais naturais e um consumo médio de menos de 6 kW (Chiusoli, 2021).



**Figura 45 e 46** – Protótipo TECLA finalizado (WASP 2021)

Neste exemplo, a seguir, é mostrado como impressoras, de menor escala, Delta 40100 estão sendo utilizadas no meio acadêmico para a exploração de materiais, neste caso a argila, material mais

comum utilizado nestas impressoras. Estas oferecem acessibilidade e um sistema aberto, ideais para experimentação com novos materiais e tecnologias de manufatura aditiva (AM).

#### **Bartlett School of Architecture, UCL**

Rameshwari Jonnalagedda - Terra Mound

Reino Unido | 2024

Na Bartlett School of Architecture da UCL (University College London), Rameshwari Jonnalagedda desenvolveu sua tese de mestrado em Design para Manufatura, onde sua pesquisa focou na criação de um sistema de resfriamento eficiente inspirado em formações naturais, como montes de cupins, por meio da impressão 3D em argila e da integração de geometrias de superfícies mínimas. O projeto foi desenvolvido utilizando a Delta WASP 40100 Clay. Essa tecnologia permitiu a criação de estruturas complexas e demonstrou a retração da máquina, o que possibilitou a criação de formas orgânicas e descontínuas. A versatilidade destas superfícies mínimas, combinada com a liberdade da impressão 3D podem ser utilizadas como sistemas de fachada, sistemas de filtração de ar e até estruturas bio-receptivas. (Severi, 2024).



**Figura 47 e 48** – Protótipos do projeto Terra Mound (Rameshwari Jonnalagedda 2024)

Por fim, serão apresentados produtos cimentícios misturados com outros resíduos e impressos em 3D com uma intersecção entre arte, design e fins arquitetônicos.

## 7.5 A impressão 3D de produtos cimentícios e outros resíduos

### Emerging Objects

Cabin of 3D Printed Curiosities

Estados Unidos | 2018

A "Cabin of 3D Printed Curiosities", projetada pelo estúdio de design Emerging Objects, é uma cabana experimental revestida com azulejos de cerâmica e cimento impressos em 3D. A fachada frontal inclui azulejos que integram vasos, criando uma parede viva de suculentas, plantas que prosperam naturalmente no clima do norte da Califórnia. A construção foi possível graças ao relaxamento das restrições para unidades habitacionais secundárias em Oakland, Califórnia, permitindo que a empresa utilizasse novas técnicas e materiais para enfrentar a crise habitacional em pequena escala.



Figura 49 e 50 – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024)

Essa cabana demonstra o potencial da manufatura aditiva na arquitetura, combinando diferentes materiais como a mistura de cimento Portland, serragem e bagaço de chardonnay. O telhado e as demais fachadas são revestidos com azulejos de cerâmica impressos em 3D no estilo "seed stitch", uma técnica que lembra o tricô, controlada por G-code para criar texturas complexas. A cabana serve como uma prova de conceito, mostrando como a impressão 3D pode ser usada para criar estruturas resistentes e inovadoras (Emerging Objects, 2018).

Cada azulejo, embora originado do mesmo arquivo, é distinto devido ao processo de impressão, que manipula a argila para criar variações. Esses azulejos funcionam como uma proteção contra a chuva e são projetados para fácil montagem na fachada. Além disso, o interior da cabine é decorado com azulejos impressos em 3D feitos de um material biológico à base de milho (Emerging Objects, 2018).

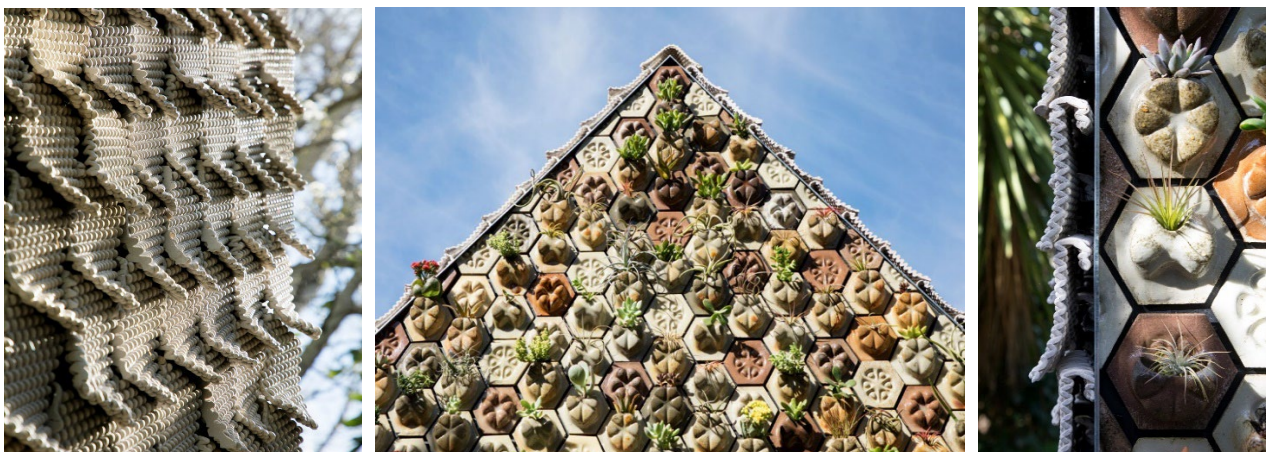


Figura 51 a 53 – Cabin of 3D Printed Curiosities (Matthew Millman2024)

## Emerging Objects

Bloom

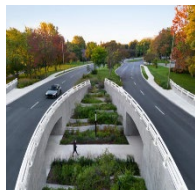
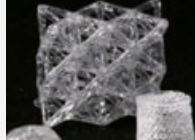
Estados Unidos | 2015

Em um outro exemplo da Emerging Objects, foi criado o pavilhão Bloom, estrutura construída a partir de 840 blocos únicos impressos em 3D com cimento Portland. O pavilhão, com 2,7 metros de altura, tem uma planta cruciforme que se transforma conforme se eleva, girando 45 graus. Na fachada, perfurações graduais nos blocos de cimento formam um design inspirado em padrões florais tradicionais tailandeses (Emerging Objects, 2015).



Figura 54 a 56 – Pavilhao Bloom (Matthew Millman2024)

Os blocos são impressos com cimento Portland sem óxido de ferro, o que confere uma cor mais clara, em conjunto com um polímero ecológico resistente aos raios UV, que reduz a produção de gases de efeito estufa em 50% em comparação com epóxis à base de petróleo. Cada bloco foi numerado durante a impressão, eliminando a necessidade de desenhos de construção complexos, e a montagem foi orientada por uma planilha que indicava a posição de cada bloco numerado (Emerging Objects, 2015).

| Empresa / Projeto                                                                   | Material Resíduo                                                    | Material associado                         | Técnica / Processo | Aplicação                         | Conceito                                      |                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>Provencher Roy</b><br>Darwin bridges<br>Canada, 2021             | 10% de Pó de vidro (Ground Glass Pozzolan) | Cimento            | Concretagem tradicional           | Grandes infraestruturas<br>Pontes             | Redução do uso do concreto, exploração de novos materiais em grandes estruturas |
|    | <b>NTU</b><br>Concrete + Glass<br>3d printing<br>Singapura, 2021    | Resíduo de vidro em substituição à areia   | Cimento            | Extrusão                          | Prototipagem inicial                          | Exploração da impressão 3d de cimento e vidro                                   |
|    | <b>MIT Mediated Matter</b><br>G3DP<br>EUA, 2014                     | Vidro puro                                 | –                  | Extrusão                          | Objetos decorativos e arquitetônicos          | Exploração da técnica de impressão de vidro                                     |
|   | <b>ETH Zurich</b><br>Group for Complex Materials<br>Suíça, 2021     | Resina de sílica foto-curável              | –                  | Estereolitografia                 | Microestruturas de elevada precisão e detalhe | Exploração da tecnologia de impressão de vidro                                  |
|  | <b>Zaha Hadid + ETH + Incremental3d</b><br>Striatum<br>Itália, 2014 | Concreto                                   | –                  | Extrusão                          | Ponte para pedestres                          | Exploração da geometria para encaixes sem argamassa e redução materiais         |
|  | <b>TU Eindhoven</b><br>Bridge Project<br>Holanda, 2021              | Concreto                                   | –                  | Extrusão                          | Ponte para bicicletas                         | Exploração da forma pela impressão 3d                                           |
|  | <b>Studio RAP</b><br>Ceramic House<br>Holanda, 2014                 | Cerâmica                                   | –                  | Extrusão braço robótico           | Fachada para loja                             | Exploração da geometria complexa pela impressão                                 |
|  | <b>Studio RAP</b><br>New Delft Blue<br>Holanda, 2019                | Cerâmica                                   | –                  | Extrusão braço robótico + Esmalte | Painel para portal                            | Exploração da geometria complexa pela impressão e cor                           |
|  | <b>ICON</b><br>Phoenix Printer<br>EUA, 2024                         | Concreto (Lavacrete)                       | –                  | Extrusão impressora Phoenix       | Residências                                   | Exploração da capacidade impressão em multiníveis e fechamentos                 |
|  | <b>ICON</b><br>Community First Village<br>EUA, 2020                 | Concreto (Lavacrete)                       | –                  | Extrusão impressora Vulcan        | Residências                                   | Exploração da capacidade de construção                                          |

|                                                                                    |                                                                            |                               |                     |                                   |                                                         |                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>ICON + BIG</b><br>El Cósmico<br>EUA, 2023                               | Concreto<br>(Lavacrete)       | –                   | Extrusão<br>impressora<br>Phoenix | Residências /<br>Hotelaria                              | Exploração da<br>capacidade<br>impressão em<br>multiníveis e<br>fechamentos |
|   | <b>WASP + Mario<br/>Cucinella</b><br>TECLA<br>Itália, 2021                 | Argila                        | –                   | Extrusão<br>Crane Wasp            | Modulo<br>habitacional                                  | Exploração da<br>capacidade<br>impressão<br>simultânea                      |
|   | <b>UCL</b><br>Terra Mound<br>Reino Unido, 2023                             | Argila                        | –                   | Extrusão Delta<br>40100 WASP      | Sistema de<br>resfriamento,<br>componente de<br>fachada | Exploração da<br>geometria<br>complexa                                      |
|   | <b>Emerging Objects</b><br>Cabin of 3D Printed<br>Curiosities<br>EUA, 2018 | Serragem, Bagaço<br>de planta | Cimento<br>Portland | Extrusão                          | Modulo<br>habitacional                                  | Exploração da<br>geometria<br>complexa e<br>misturas de<br>materiais        |
|  | <b>Emerging Objects</b><br>Bloom<br>EUA, 2015                              | Cimento Portland              | –                   | Extrusão                          | Pavilhão                                                | Exploração da<br>geometria<br>complexa e uso do<br>cimento                  |

**Tabela 03** – Tabela síntese da pesquisa de mercado

### III. Caso de Estudo

#### 1. Objetivos

Tendo em vista os temas apresentados no capítulo 2, onde influenciaram e justificaram a tomada de decisões, a exemplo de: escolha do tipo de vidro, granulometria e percentagens de substituição; pretende-se estudar a inclusão de resíduos finos de vidro como agregados e pó de vidro como substituinte parcial do cimento para a produção de argamassas cimentícias propícias para a impressão 3D.

Para a realização deste processo, houve a inspiração na metodologia do *Material Driven Design* (MDD). Uma abordagem concentrada nas qualidades técnicas e experienciais dos materiais para informar o processo de design de forma eficaz, onde primeiramente é desenvolvido o material para depois fabricar o produto. Foi seguida uma lógica similar do MDD que consiste em quatro etapas principais: Compreender a situação atual e a percepção do material, visualizar as intenções de design e criar uma visão para novas experiências com o material, manifestar padrões para trazer à vida as experiências com o material previstas, dar sentido ao refletir sobre o propósito do material ao longo do processo de design. (Karana et al., 2015)

O MDD é especialmente relevante no contexto de sustentabilidade e inovação, pois incentiva o uso de materiais alternativos, reciclados ou biodegradáveis, e promove a criação de produtos com menor impacto ambiental. Como também, aborda o Design enquanto processo e não apenas como produto final.

Foi organizado um plano experimental para a realização dos testes em três etapas: Estudo de composições de material, calibração e aperfeiçoamento para impressão e testes, e por fim impressão do produto desenvolvido com o material mais apto para a impressão 3D a partir dos testes das primeiras duas etapas. Testes mecânicos foram realizados nas misturas selecionadas para comprovar se as propriedades mecânicas foram melhoradas. Este estudo tem o intuito de buscar soluções quanto ao descarte de vidro que não volta tão facilmente para o ciclo do vidro e a diminuição do impacto ecológico na redução do uso de cimento e da exploração de matérias-primas virgens.

## **2. Parâmetros de capacidade de impressão**

Como exposto anteriormente, o processo geral de impressão 3D de materiais cimentícios tem parâmetros que guiam uma impressão bem-sucedida, e pode ser dividido em três fases: preparação da mistura, transporte da mistura ao sistema de extrusão e, finalmente, extrusão. Durante a fase de entrega, espera-se que uma mistura ideal apresente boa capacidade de extrusão ou fluidez; no entanto, o material precisa se estabilizar rapidamente após a extrusão para suportar as cargas das camadas subsequentes. Trabalhabilidade, capacidade de extrusão, fluidez, capacidade de construção, bombeabilidade e tempo de abertura são definidos como os parâmetros de interesse. Para garantir o bom desempenho dessa argamassa com a adição de vidro, os parâmetros anteriormente mencionados devem ser alcançados.

## **3. Materiais e métodos**

Para a confecção das argamassas foi utilizado o pó de vidro e o Cimento Portland CEM I 52,5 Branco) da Secil, que é apropriado para utilizações correntes e produção de Betão arquitetônico conforme as Normas Europeias EN-197-1. A areia natural utilizada foi a de rio com granulometria de 1mm. O pó de vidro para este estudo foi obtido a partir de rejeitos de vidro plano sodo-cálcico gentilmente doados pela vidraria Fonseca, situada na Maia. Empresa fabricante e instaladora de vidro com diversas aplicações tais como janelas, vitrais, prateleiras, pavimentos em vidro etc. Os desperdícios de produção desta empresa são normalmente coletados e enviados para uma empresa terceira especializada em gestão de vidro e reciclagem, porém há outros rejeitos de vidro que não são aptos para a reciclagem devido à sua composição, cor e mistura com outros materiais, a exemplo dos espelhos e dos laminados, que são triturados e despejados em aterros.



**Figura 57 e 58** – Rejeitos de produção coletados e aptos para reciclagem da vidraria Fonseca

A decisão de utilizar esse tipo específico de vidro rejeitado foi baseada em vários fatores: a maior parte da literatura anterior focou no uso de vidro sodo-cálcico; a facilidade de obtenção desse material na região do Porto em grandes quantidades, sem enfrentar complicações ou burocracias, foi outro ponto importante, visto que a empresa busca uma solução para seus rejeitos; além disso, esses materiais já estão prontos para uso, pois são tratados, limpos, categorizados e livres de misturas ou grandes contaminações por outras substâncias e materiais.



**Figura 59** – Rejeitos de produção da vidraria Fonseca para serem triturados e despejados em aterro

Após a coleta dos rejeitos de vidro, estes ainda precisavam ser processados e triturados. Numa primeira fase de processamento, estes materiais foram quebrados manualmente com um martelo e depois passados por um crivo de 2,36mm para a separação. O resultado desta primeira crivagem foi triturado em um almofariz e crivado novamente por um agitador de peneiras numa granulometria menor que 1,7mm por 10 minutos.



**Figura 60 e 61** – Resíduos de vidro antes e depois de serem quebrados manualmente



**Figuras 62 a 65** – Crivagem a 2,36mm, moagem em almofariz, crivagem em agitador de peneiras, e partículas de vidro menores que 1,7mm respetivamente.

Em seguida, foi percebido que este processo era trabalhoso e gerou pouco material na granulometria desejada. Portanto, o passo seguinte era triturar estes resíduos de vidro de maior dimensão em partículas menores, de forma mais eficiente. Assim, foi utilizado um britador de maxilas, disponibilizado pelo departamento de engenharia geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.



**Figuras 66 a 68** – Britador de maxilas, resíduos após britagem e resultado após contínuas operações.

Esses resíduos, que antes eram quebrados manualmente, foram submetidos ao processo de britagem devido ao seu grande tamanho. O britador de mandíbulas funciona comprimindo o material entre uma mandíbula fixa e outra móvel, resultando em pedaços menores e mais uniformes. Esse equipamento é essencial para reduzir grandes volumes de material em granulometrias menores, adequadas para etapas subsequentes. A figura acima ilustra o pó de vidro reciclado e moído, obtido a partir das frações maiores dos resíduos de vidro.

Após a britagem, o material foi passado por um agitador de peneiras para separar os grãos conforme o tamanho desejado. O material resultante foi passado nas peneiras: 2,36mm; 1,7mm e 75  $\mu\text{m}$  (n° 200). Nesta crivagem houve o objetivo de obter resíduos de pó de vidro (PV) de granulometria < 75 $\mu\text{m}$  para serem utilizados como substituinte parcial ao cimento e obter os resíduos de vidro finos (RV) de granulometria 2,36 a 1,7mm, 1,7 a 0,075mm e posteriormente 0,85mm – 0,075mm como agregados substituintes de areia na argamassa cimentícia.



**Figuras 69 e 70** – Resultantes da crivagem de variadas granulometrias

## 4. Plano Experimental

O plano experimental tem como objetivo estabelecer um método uniforme de testes e busca primariamente diminuir o uso de ligante (cimento) e não utilizar agregados naturais (areia) nestas argamassas. Para isso houve a busca por encontrar o limite máximo de utilização dos resíduos de vidro em ambos os casos, individualmente e em conjunto, não comprometendo as características necessárias para impressão. São testadas diferentes proporções de materiais nas argamassas, sendo o pó de vidro em substituição ao cimento e o agregado de vidro fino em substituição à areia.

Com base na literatura apresentada no capítulo anterior, o plano experimental considerou a redução de cimento (ligante) na argamassa através da reutilização de resíduos finos ( $< 75 \mu\text{m}$ ) de pó de vidro sodo-cálcico, substituindo parcialmente o cimento em proporções de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30% para a produção de argamassas cimentícias. A literatura sugere um limite de até 30% de substituição para obter bons resultados, utilizando uma granulometria inferior a  $75 \mu\text{m}$ . A escolha dessa granulometria é vista como um equilíbrio adequado: é suficientemente fina para garantir a atividade pozolânica, ao mesmo tempo em que leva em consideração as dificuldades de obtenção de material com granulação menor em grandes quantidades, devido às limitações do processo neste estudo.

A substituição dos agregados naturais (areia) pelos resíduos de vidro é dada em granulometrias variadas de 2,36 – 1,7mm e  $< 1,7 \text{ mm}$ . Estas escolhas de granulometria se dão, primariamente, pelo tamanho do bico de extrusão da impressora 3D Delta WASP 40100 a ser utilizada neste estudo, e pela tentativa de experimentação e apelo da aparência estética da argamassa e pelas opções de crivos disponíveis no laboratório. As misturas de argamassa contendo substituições de pó de vidro ou resíduo fino de vidro foram preparadas adotando uma relação água/aglomerante de 0,25 e uma proporção de agregado para aglomerante de 0,23 como mistura base.

Em resumo, o plano experimental foi dividido em três fases:

### **Primeira fase: Compreensão do material**

Nesta fase, foram criadas várias amostras com diferentes quantidades de materiais para avaliar a textura e as características que são necessárias à impressão 3D. O objetivo desta parte é validar as proporções planejadas e realizar uma análise dos resultados da performance de trabalhabilidade, capacidade de extrusão e capacidade de construção. Com base nessa análise, serão selecionadas amostras para a realização de testes de impressão.

## **Segunda fase: Calibração da impressão**

Esse processo é crucial para compreender como a impressora opera em conjunto com a argamassa, que é composta por cimento, pó de vidro, resíduo fino de vidro e água. Assim, é essencial avaliar se a quantidade de resíduo de vidro inserido na argamassa causa obstruções no bico de extrusão e interrupção no processo de impressão, ou se a impressão ocorre de maneira fluida, sem que seja preciso forçar ou aumentar a intensidade do *flow* de impressão. Mesmo que algumas argamassas testadas possuam boas características para outras técnicas de fabrico, como por exemplo, o molde, neste presente caso de estudo, sua composição foi alterada para sempre favorecer o processo de impressão e a sua fluidez. O tamanho da impressora e seu bocal também influenciaram os resultados e a seleção das argamassas. Só então partir dos resultados de calibração, que ensaios mecânicos são realizados.

## **Terceira fase: Impressão do material**

Após a análise e os testes conduzidos no estudo do material e na calibração do processo, a impressão do produto desenvolvido é realizada finalmente, utilizando a argamassa escolhida com base na solução ideal identificada no estudo. O desenvolvimento, a apresentação do produto, suas validações e conclusões serão discutidos no capítulo 5 e nas considerações finais.

### **4.1 – Compreensão do material**

Nesta fase do plano experimental, foram desenvolvidas diversas composições, com o objetivo de investigar a capacidade do material em termos de extrusão e capacidade de construção. Todas as amostras seguiram uma sequência padronizada de procedimentos. O método de avaliação adotado neste estudo é semelhante ao utilizado pelos mestrandos e doutorandos Elis Regina Ribeiro e João Teixeira, do Laboratório de Digitalização da Construção da FEUP, sob a liderança da professora Bárbara Rangel, onde todos os testes, ensaios e impressões 3D foram realizados. Este método utilizado visa uniformizar os procedimentos para uma avaliação parametrizada e garantir a consistência na exploração dos diversos materiais para impressão pelos estudantes do laboratório. Foram analisados aspetos como a trabalhabilidade da argamassa, fluidez na extrusão, retenção de forma, adesão entre camadas e tempo de utilização. Os testes realizados nesta etapa de caracterização do material incluíram:

**Ensaio de abaixamento:** Tipo de teste realizado para avaliar a capacidade do material de manter sua forma. Nesse teste, utiliza-se um molde com formato de tronco cônico ou cilíndrico, onde a argamassa é adicionada até a borda. Em seguida, o molde é levantado verticalmente a uma velocidade constante. O abaixamento é medido pela diferença entre a altura original do molde e a altura final da argamassa. No presente estudo, o molde utilizado foi um cilindro de PVC com 50 mm

de altura e 60 mm de diâmetro. Como base para este teste o estudo do artigo Spread is better: An investigation of the mini-slump test de Jinglong Gao e Andy Fourie foi usado como referência. (Gao & Fourie, 2015) Os resultados desses ensaios estão disponíveis nos anexos, nas páginas finais deste estudo.

**Ensaio de capacidade de extrusão:** Tipo de teste realizado para avaliar se o material tem trabalhabilidade necessária para passar no bico do extrusor da impressora sem nenhum problema de entupimento ou força excessiva pela máquina, ao produzir um filamento contínuo e uniforme, sem falhas. Para este teste foi utilizado um saco de confeiteiro de plástico, e para cada amostra um filamento de 100 mm foi realizado.

**Ensaio de capacidade de construção:** Tipo de teste realizado para verificar a estabilidade do material enquanto novas camadas são depositadas sobre ele, além de avaliar a aderência entre as camadas. O objetivo é aplicar cinco camadas de filamentos de 100 mm, sobrepondo-as umas às outras.



Figura 71 – Fluxograma de realização dos ensaios

#### 4.1.1 Ensaios da primeira fase: Compreensão do material

As argamassas desenvolvidas para estes testes tiveram como referência de composição uma argamassa base testada anteriormente em um teste de calibração da impressora Delta WASP 40100. Esta razão de 1: 0,23: 0,25 (massa) é baseada em uma composição usada para calibração da impressora 3D, onde a partir destas quantidades de cimento (aglomerante) vão decrescendo e agregados aumentando.

Para a preparação destas amostras e incorporação de vidro nas argamassas, os materiais foram separados, pesados, misturados numa batedeira, e depois colocados em um saco plástico, com um bico de extrusora semelhante ao tamanho do bico da impressora, para serem extrudidos manualmente e assim testar suas capacidades de extrusão, construção e trabalhabilidade da argamassa.

Foram realizados diferentes métodos de incorporação de resíduos na argamassa, os ensaios realizados foram divididos em amostras que substituem cimento por pó de vidro e amostras que substituem areia por resíduo de vidro, com o objetivo de avaliar a influência da granulometria e quantidade de vidro reciclado nas propriedades das argamassas.

#### **4.1.2 Composições de argamassas cimentícias com substituição parcial de cimento por pó de vidro**

Para estes primeiros ensaios foram desenvolvidas amostras com 500g de material sólido, uma quantidade de material necessária para avaliar e validar a capacidade de extrusão. Para a realização destas amostras buscou-se manter a constante de areia (94g) e então e conforme o aumento da proporção de pó de vidro, diminuía-se a quantidade de cimento a ser adicionado, sendo a água ajustada com o intuito de manter a capacidade de extrusão e trabalhabilidade da amostra. O objetivo deste ensaio foi analisar a capacidade de extrusão da argamassa (Fig.72), a alteração da textura, da necessidade de adição de água ao diminuir a quantidade de cimento e incluir o novo material.

| Composição | Pó de vidro (%) | Pó de vidro (g) | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Abaixamento (mm) |
|------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------|----------|------------------|
| CP0        | 0%              | 0               | 406         | 94        | 100      | 4                |
| CP5        | 5%              | 20,3            | 385,7       | 94        | 110      | 4                |
| CP10       | 10%             | 40,6            | 365,4       | 94        | 120      | 4                |
| CP10-2     | 10%             | 40,6            | 365,4       | 94        | 140      | 7                |
| CP15       | 15%             | 60,9            | 345,1       | 94        | 120      | 3                |
| CP15-2     | 15%             | 60,9            | 345,1       | 94        | 140      | 10               |
| CP20       | 20%             | 81,2            | 324,8       | 94        | 120      | 3                |
| CP20-2     | 20%             | 81,2            | 324,8       | 94        | 130      | 5                |
| CP25       | 25%             | 101,5           | 304,5       | 94        | 130      | 10               |
| CP25-2     | 25%             | 101,5           | 304,5       | 94        | 140      | 10               |
| CP30       | 30%             | 121,8           | 284,2       | 94        | 120      | 4                |
| CP30-2     | 30%             | 121,8           | 284,2       | 94        | 130      | 3                |

**Tabela 04** - Composição de argamassas cimentícias com substituição parcial de cimento por pó de vidro

Durante o processo experimental, observou-se que, para preservar a trabalhabilidade da massa no processo de mistura, era necessário aumentar a quantidade de água conforme a quantidade de pó de vidro aumentava. No entanto, para avaliar o comportamento das argamassas, foram adicionadas quantidades maiores e menores de água em cada amostra, uma variação ora de 10 ou 20g de água, a fim de determinar se a dosagem excessiva deixava a amostra demasiado fluida ou se era realmente necessária. É possível observar uma maior fluidez nas amostras que receberam mais água através do ensaio de abaixamento. Com isso é possível perceber a relação da quantidade da água adicionada com um maior valor de abaixamento. Embora algumas amostras tenham recebido mais água do que outras, todas as amostras curaram rapidamente e foram facilmente removidas da tábua de secagem.

Vale ressaltar que a extrusão manual utilizada nestes experimentos pode influenciar a precisão e a exatidão do teste de capacidade de construção (Fig.73), devido à falta de controle da força aplicada e velocidade, afetando o direcionamento das camadas realizados manualmente, resultando em camadas mais achatadas e outras mais cilíndricas. Foi possível notar uma pequena rugosidade das amostras com maiores quantidades de pó de vidro. E uma rugosidade daquelas que levaram menores quantidades de água. Observou-se que as amostras com 130g de água em amostras com maiores quantidades de pó de vidro apresentavam uma consistência equilibrada, nem muito fluida nem muito seca, indicando que essa quantidade de água era ideal. As condições de cada experimento estão detalhadas nos anexos.



**Figura 72** – Ensaio da capacidade de extrusão de amostras com pó de vidro

No teste de capacidade de construção (figura 73), todas as amostras experimentadas permitiram a criação de pelo menos cinco filamentos sobrepostos. No entanto, às vezes, a estrutura tombava quando recebia carga. Supõe-se que isso se deve ao fato de o processo ser realizado manualmente e as camadas não se sobrepõem corretamente, já que não foram observadas deformações nos primeiros filamentos.

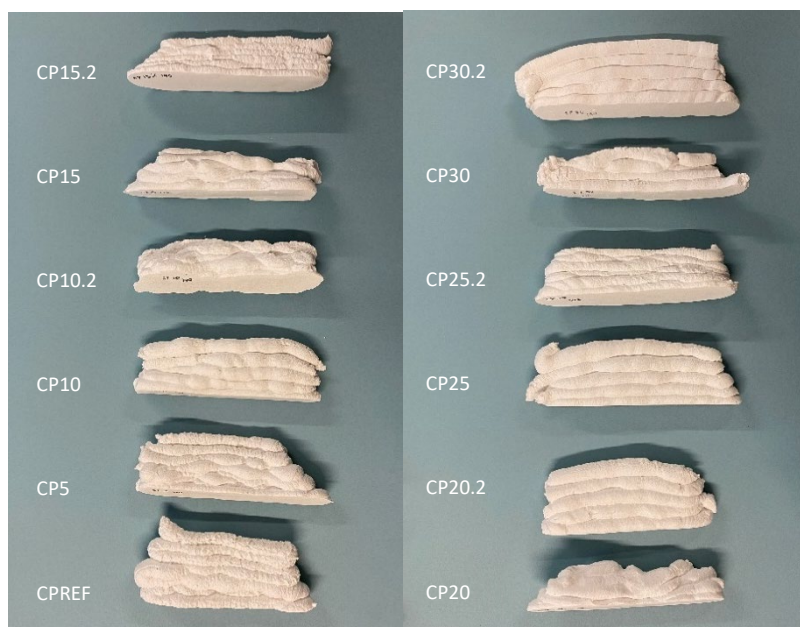


**Figura 73** – Ensaio da capacidade de construção de amostras com pó de vidro

É possível notar uma dificuldade de extrusão nas amostras com menores quantidades de água (CP15, CP20, CP30.2) é notado também pelo seu baixo valor de abaixamento, resultando em um maior

descontrole e deformidade das camadas. Embora todos os provetes tenham mostrado visualmente uma boa aderência entre as camadas, a fragilidade das amostras e suas deformidades podem ser atribuídas a problemas decorrentes da extrusão manual sem precisão. No gráfico a seguir pode-se perceber a relação do alto abaixamento com as composições de amostras que levaram a maior quantidade de água, por exemplo.

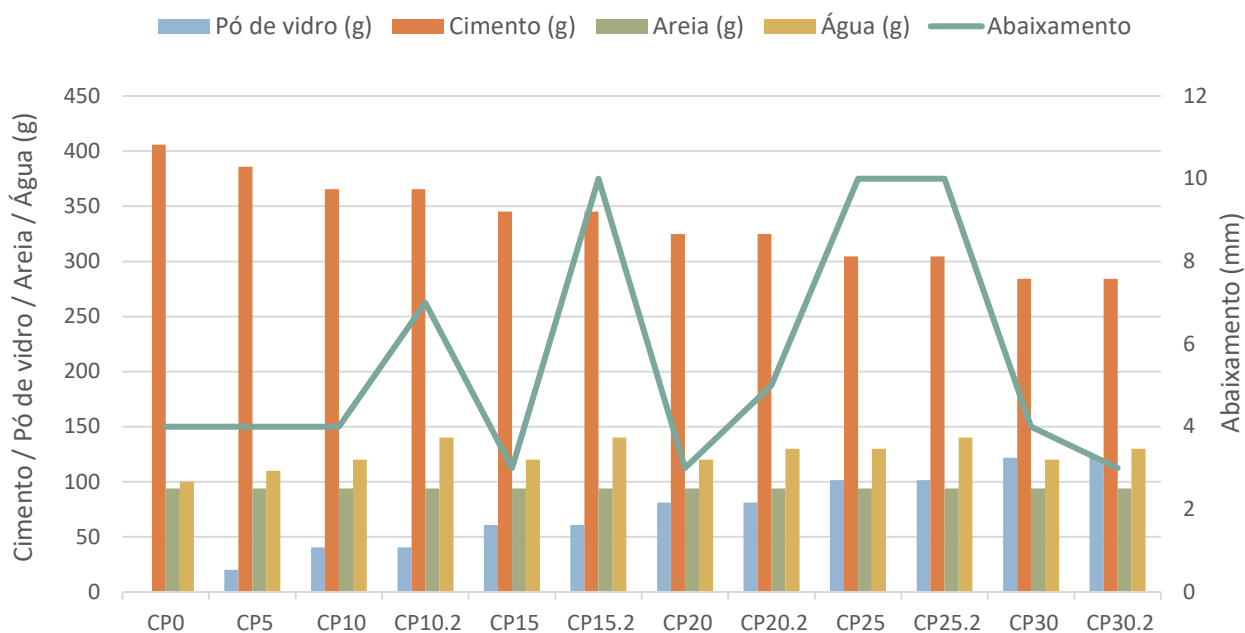


Gráfico 01 – Variação do abaixamento das amostras com pó de vidro



Figura 74 – Extrusão manual de amostras com diferentes teores de água

A imagem anterior mostra como a diferença de 100 a 140g de água influencia na aparência e fluidez da argamassa, em que esta deve ser fluida, mas ainda apta para a construção de camadas. É possível notar pelas percentagens de massa das amostras, que foi buscada uma proporção ideal para alcançar uma boa solução, ao buscar uma proporção mais balanceada dos materiais utilizados conforme o gráfico a seguir.

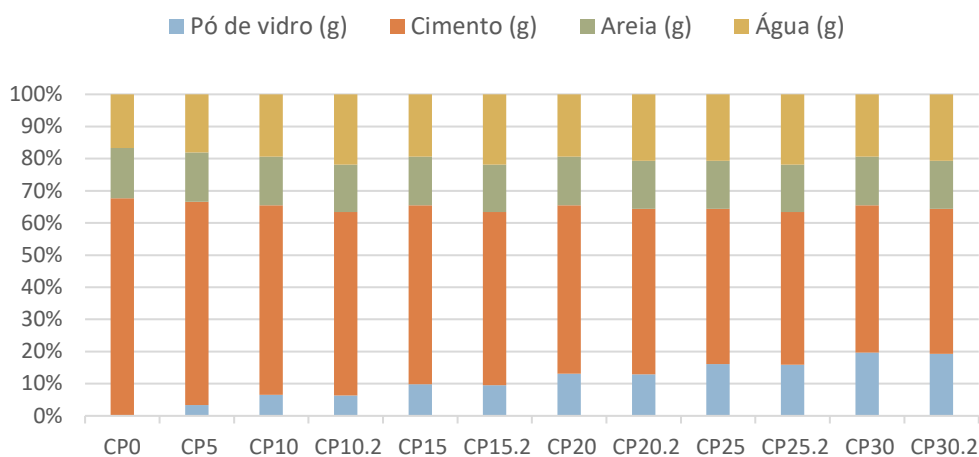


Gráfico 02 – Proporção dos materiais das composições com pó de vidro

A partir dos cilindros produzidos para o ensaio de abaixamento, observa-se que não houve uma variação cromática significativa. Isso se deve ao uso de cimentos brancos, ao fato de o pó de vidro transparente ter uma aparência semelhante ao próprio cimento, e à cor clara da areia utilizada.



Figura 75 – Provetes dos ensaios de abaixamento das amostras com pó de vidro

#### 4.1.3 Composição de argamassas cimentícias com substituição de areia por resíduo de vidro

Após os ensaios iniciais, foi dado prosseguimento ao desenvolvimento de testes visando eliminar a areia da composição. Foram produzidas amostras contendo 500g de material sólido, semelhante à série anterior de ensaios, considerada suficiente para avaliar e validar a capacidade de extrusão. Durante a preparação dessas amostras, manteve-se constante a quantidade de cimento (406g), e à medida que se aumentava a proporção de resíduo de vidro, a quantidade de areia adicionada era reduzida, com a água ajustada após a amostra de referência para 130g, valor considerado ideal com base nos ensaios anteriores. Diferentes proporções e combinações de granulometrias foram testadas, variando de 2,36mm a 0,075mm, com taxas de substituição de 0%, 50%, 75% e 100%. O

objetivo deste ensaio foi analisar a alteração na textura da argamassa resultante da mistura de granulometrias, ao reduzir a quantidade de areia fina e introduzir um novo material, como o vidro, em partículas maiores, visando manter a capacidade de extrusão.

| Composição | Granulometria                             | Resíduo de vidro (%) | Resíduo de vidro (g) | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Abaixamento (mm) |
|------------|-------------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------|-----------|----------|------------------|
| CR0        | 1mm                                       | 0%                   | 0                    | 406         | 94        | 100      | 4                |
| CR50.1     | 1,7 - 0,075 mm                            | 50%                  | 47                   | 406         | 47        | 130      | 5                |
| CR75.1     | 1,7 - 0,075 mm                            | 75%                  | 70,5                 | 406         | 23,5      | 130      | 4                |
| CR100.1    | 1,7 - 0,075 mm                            | 100%                 | 94                   | 406         | 0         | 130      | 3                |
| CR50.2     | 2,36 - 1,7 mm (25%); 1,7 - 0,075 mm (25%) | 50%                  | 47                   | 406         | 47        | 130      | 4                |
| CR75.2     | 2,36 - 1,7 mm (25%); 1,7 - 0,075 mm (50%) | 75%                  | 70,5                 | 406         | 23,5      | 130      | 4                |
| CR100.2    | 2,36 - 1,7 mm (50%); 1,7 - 0,075 mm (50%) | 100%                 | 94                   | 406         | 0         | 130      | 5                |

**Tabela 05** - Composição de amostras com substituição de areia por resíduo de vidro

Observou-se que a tentativa de manter a quantidade de água não foi totalmente eficaz, pois algumas amostras apresentaram dificuldades na extrusão, o que também pode ser influenciado pelo fato de o processo ter sido realizado manualmente. Apesar disso, ao analisar os resultados do ensaio de abaixamento, a maioria das amostras apresentou valores abaixo de 5 a 6 mm, o que é considerado ideal.



**Figura 76** – Ensaio da capacidade de extrusão de amostras com resíduo de vidro

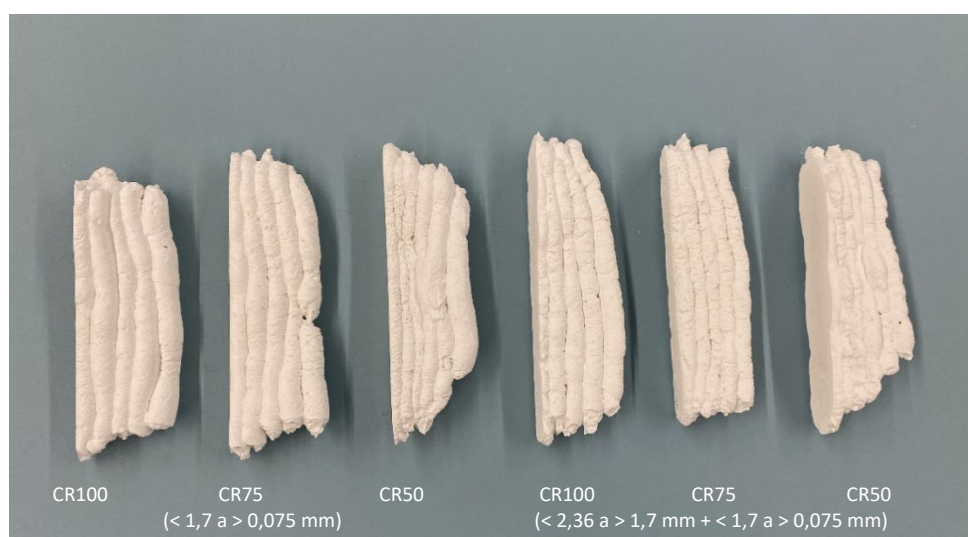


**Figura 77** – Ensaio da capacidade de construção de amostras com resíduo de vidro

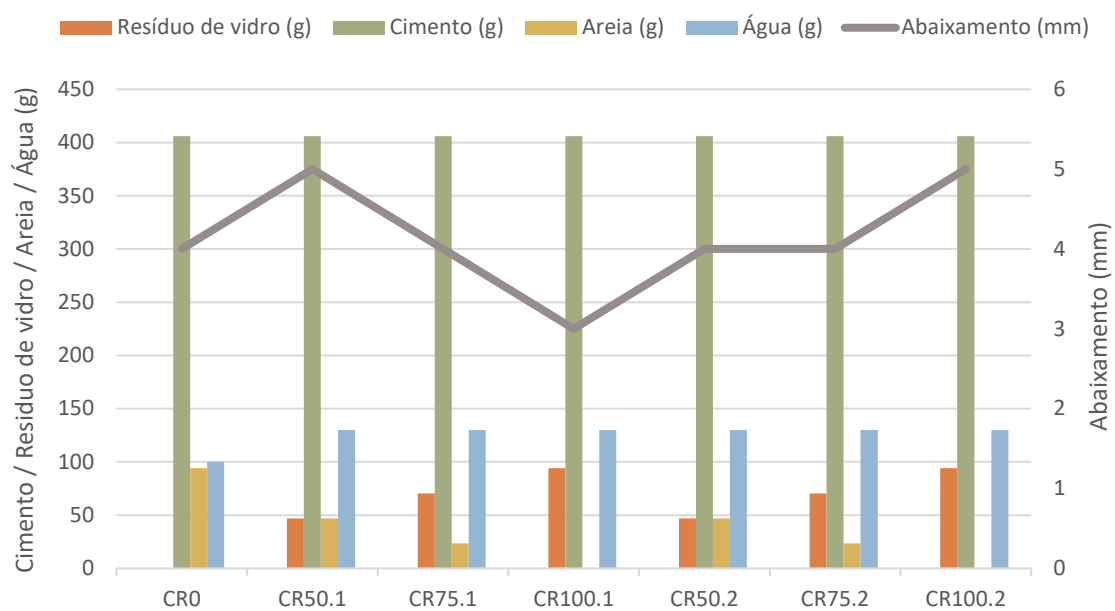


Gráfico 03 – Variação do abaixamento das composições desenvolvidas

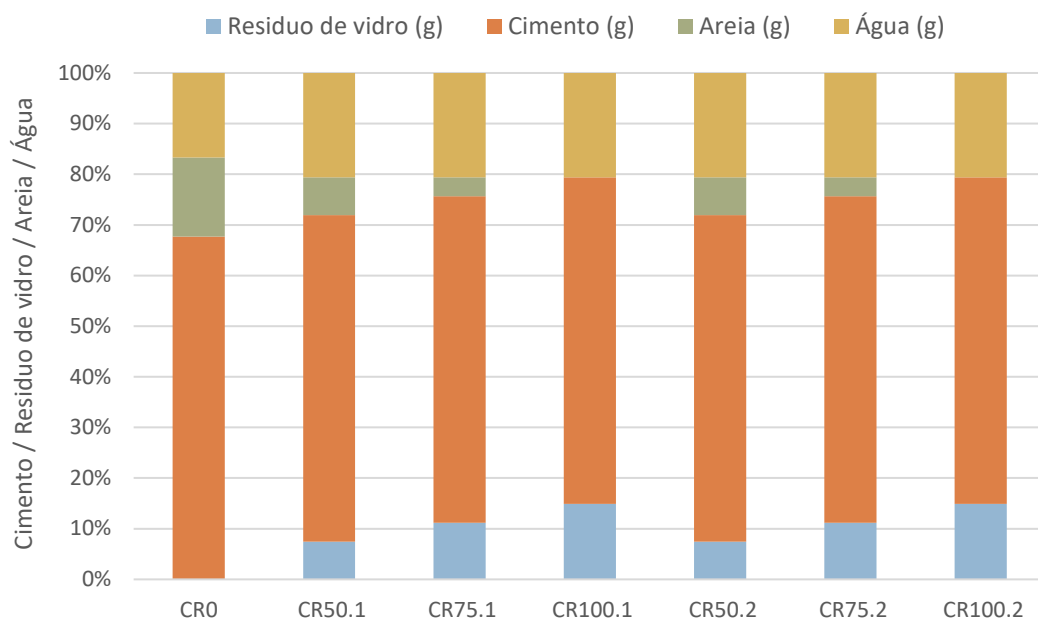


Gráfico 04 – Proporção dos materiais das composições com resíduo de vidro

#### 4.1.4 Teste cromático

Os ensaios anteriores feitos com cimento branco e vidro transparente não resultaram em grandes mudanças cromáticas, apenas de brilho e textura rugosa e áspera. Foram feitos alguns experimentos com finalidade de exploração estética para saber como a mistura se comportava com pigmentos de óxido de ferro azul ultramar, vermelho e verde e resíduos de vidro de maior granulometria. Para uso na mistura e impressão dos objetos, mas posteriormente, descartado para não influenciar nas propriedades químicas do material em estudo.

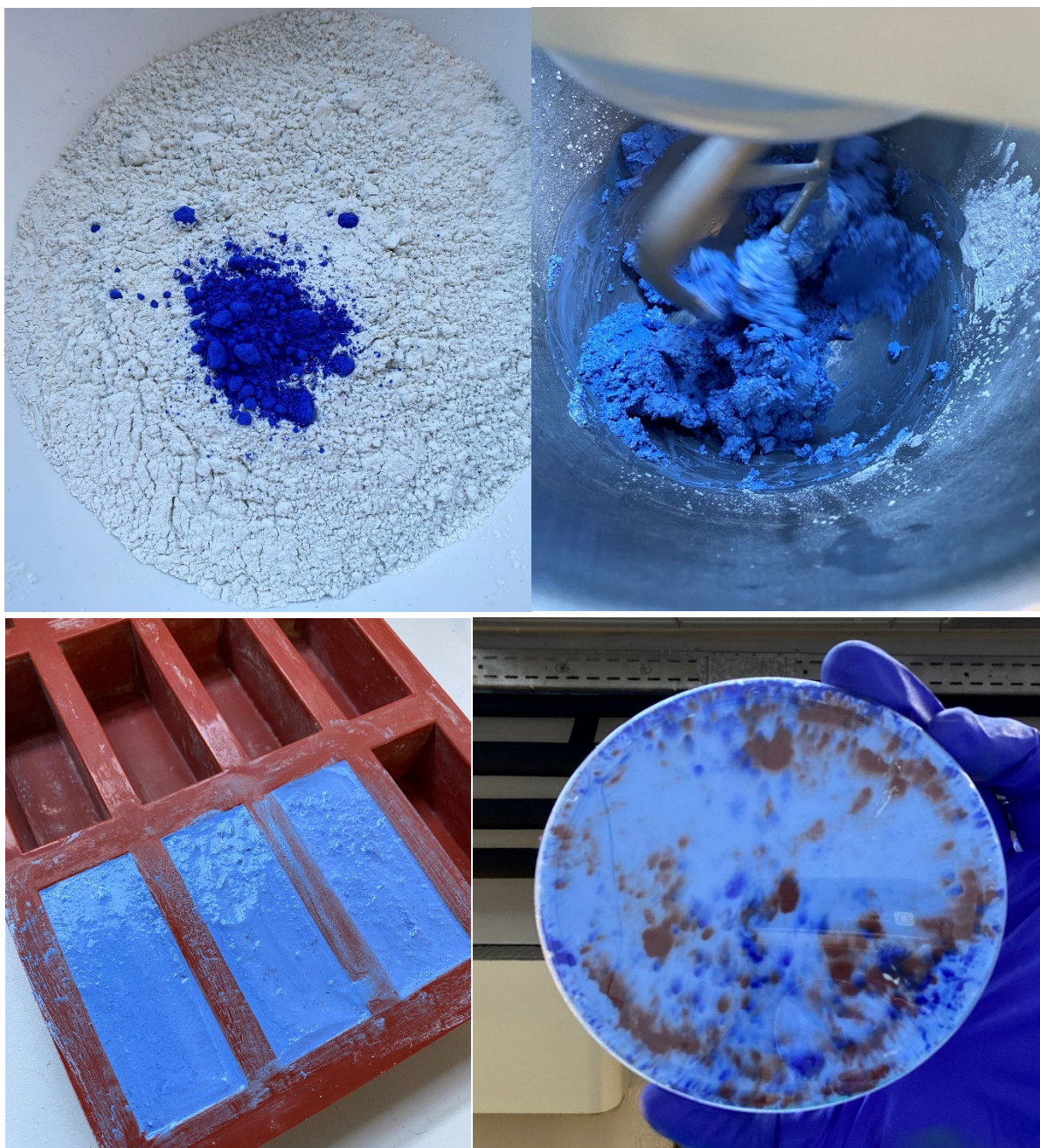


Figura 78 a 81 – Ensaio cromático da argamassa com óxido de ferro azul.

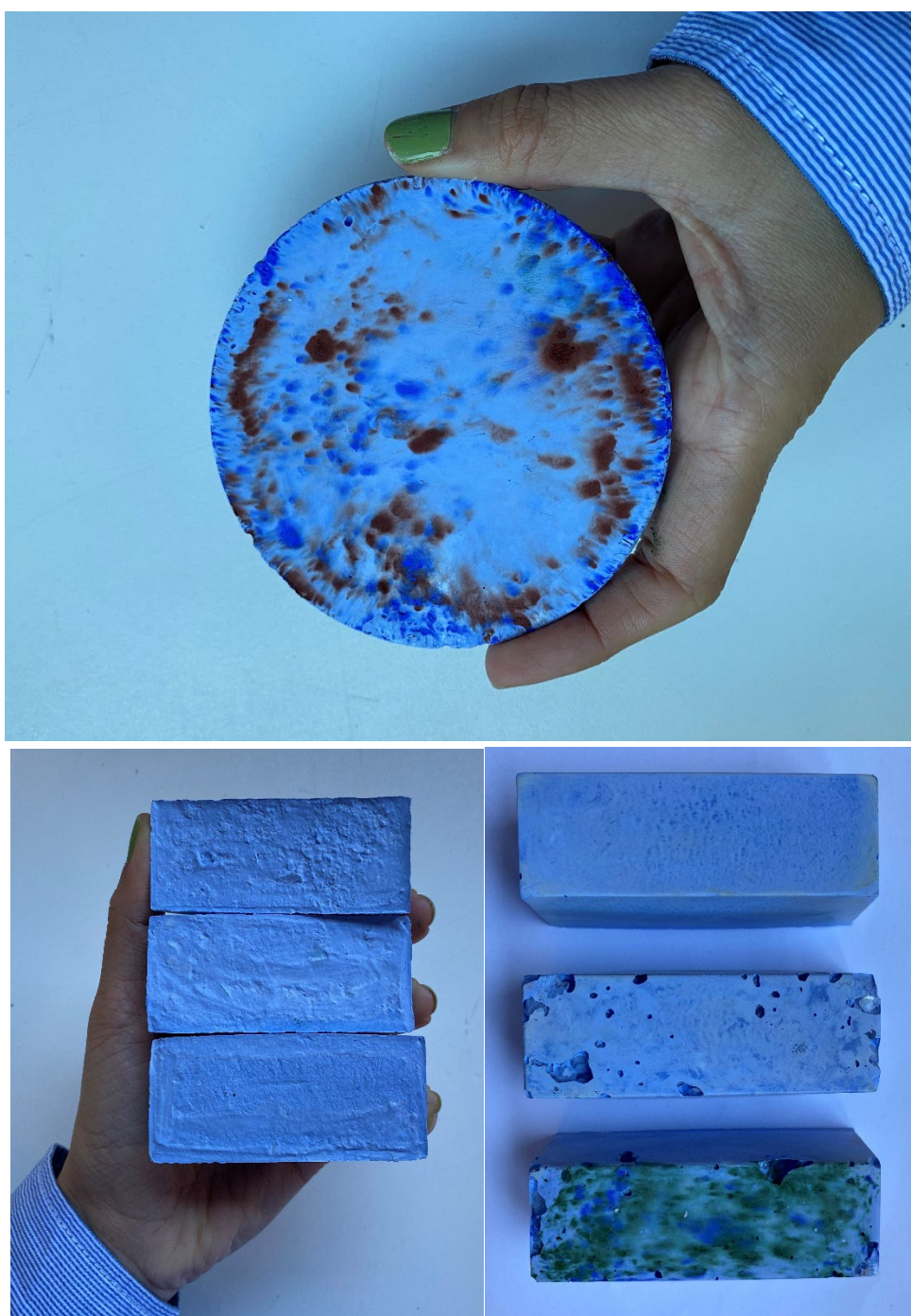


Figura 82 a 84 – Resultado dos experimentos das argamassas com oxido de ferr

Para a próxima série de ensaios, foi realizada a dupla substituição de areia e cimento por resíduo fino e pó de vidro. Embora os testes manuais tenham sido úteis para observar certos comportamentos do material em relação à água, às proporções de materiais e à certas capacidades, reconheceu-se que esses testes não forneciam a precisão necessária para determinar a fluidez ideal do composto. Portanto, decidiu-se realizar esta série de testes utilizando a impressora, enquanto esta era calibrada. Essa abordagem foi escolhida porque as proporções iniciais seriam, de qualquer forma, ajustadas para otimizar o desempenho da máquina e seu comportamento durante o processo.

## 4.2 Calibração da Impressora e primeiras impressões

Para avaliar o desempenho das argamassas com adição de vidro para a impressão, foram estabelecidos critérios que elas deveriam atender. Esses critérios incluíam: a realização bem-sucedida da impressão até o final, sem interrupções; a uniformidade dos filamentos e a formação correta das camadas; a uniformidade das camadas; a manutenção da estabilidade dimensional; e a integridade da primeira camada ao longo de todo o processo de impressão.

A partir dos testes desenvolvidos anteriormente para compreensão inicial do material, estes foram adaptados para a calibração da impressora, sendo utilizada a Delta Wasp 40100 durante todo este estudo. Era necessário calibrar a impressora para saber, por exemplo, qual o limite de areia utilizada para a amostra de referência, assim como, saber o limite de resíduo de vidro utilizado sem que comprometesse a impressão com o entupimento do bico da extrusora ou dificuldades de impressão que não foram identificadas com a extrusão feita apenas manualmente. Sendo necessária a compreensão do comportamento das misturas com vidro na impressora, a exemplo de: como as camadas se depositam umas sobre as outras, como a quantidade de água influencia na trabalhabilidade da massa, qual o *flow* de impressão e compreender teste após teste o que deveria ser modificado.



**Figura 85** – Delta Wasp 40100, impressora utilizada neste estudo.

Foram realizados, inicialmente, quatro testes de calibração com o objetivo de identificar a quantidade máxima de areia adequada para o processo de impressão. Em cada uma das misturas, utilizou-se uma quantidade fixa de 1 kg, combinando os mesmos tipos de cimento e areia desde o início do processo, em que a proporção de cimento se iniciava elevada e era gradualmente reduzida à medida que a quantidade de areia aumentava.

Para os dois primeiros testes (REF.1 e REF.2) foi impressa uma peça de geometria genérica para verificar a deposição de camadas e o processo de impressão, no qual se deu de maneira satisfatória sem interrupções, utilizando todo o material do funil.

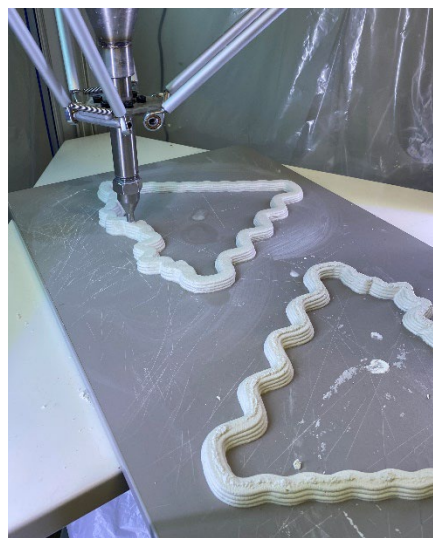


**Figura 86** – Impressão das Referências 1 e 2

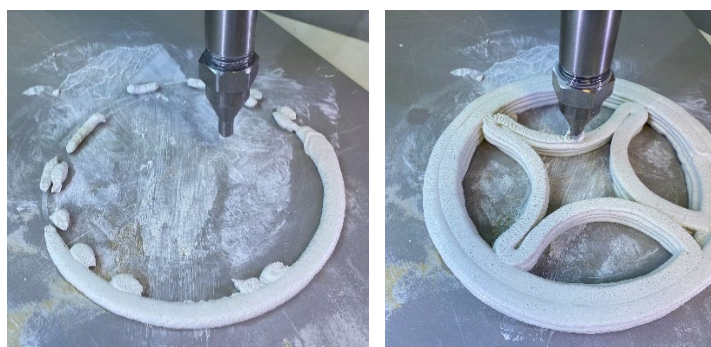
Idealmente, a quantidade de água deveria ser diminuída conforme a redução do cimento. Observou-se que a terceira amostra (REF.3) apresentou dificuldades na extrusão, resultando em entupimentos frequentes do bico da extrusora em vários momentos da impressão, com os filamentos ora íntegros ora apresentando falhas. Para o teste subsequente (REF.4), a água foi aumentada e a quantidade de areia foi reduzida, com os valores ajustados para se situarem entre aqueles utilizados nas amostras REF.2 e REF.3. A primeira camada apresentou filamentos com falhas, mas seu flow foi ajustado a 90% e velocidade de 40mm/s e obteve uma boa extrusão por toda a impressão, com filamentos contínuos e uniformes. Portanto este foi considerado o limite da areia. Nestes testes mencionados acima, foi utilizado o cone metálico de 60 mm de altura para o teste de abaixamento e a exploração de uma nova geometria para a avaliação da construção de camadas.



**Figura 87** – Ensaio de abaixamento com cone metálico



**Figuras 88 a 89** – Teste de impressão da Referência 3



**Figuras 90 e 91** – Teste de impressão da Referência 4

| Granulometria: <1mm |             | Temperatura ambiente: 21,39° Umidade: 57% |          |                  |
|---------------------|-------------|-------------------------------------------|----------|------------------|
| Composição          | Cimento (g) | Areia (g)                                 | Água (g) | Abaixamento (mm) |
| Ref.1               | 812,5       | 187,5                                     | 260      | 13mm             |
| Ref.2               | 700         | 300                                       | 234      | 16mm             |
| Ref.3               | 600         | 400                                       | 208      | 13mm             |
| Ref.4               | 650         | 350                                       | 213      | 12mm             |

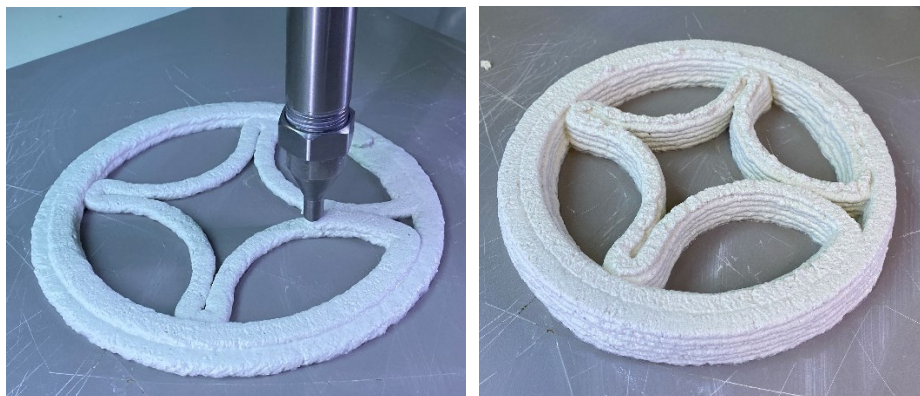
**Tabela 06** - Composições de argamassas para a calibração da quantidade de areia utilizada

Nos testes subsequentes de substituições, a proporção da amostra 4 foi adotada como referência, porém com metade da quantidade de material, correspondendo a 325g de cimento e 175g de areia, totalizando 0,5kg de material. A partir dessa base, realizaram-se as substituições da areia por resíduo de vidro, em percentagens variando de 10% a 100%, utilizando granulometria entre 1,7 mm e 75  $\mu$ m. Os ensaios com substituições de 10% a 70% foram realizados de forma satisfatória.



**Figura 92** – Teste de impressão da amostra C10

Foi dobrada a quantidade de material para cada amostra nos ensaios de 80% a 100% de substituição. Para perceber as características de capacidade de construção com mais camadas. Portanto passando de 0,5kg para 1kg de material. Para estes testes foi utilizado o cilindro de 50mm para o teste de abaixamento. A amostra com 80% de substituição obteve sucesso na impressão, com velocidade a 100 e flow a 137, apesar de ter necessitado 5g de água a mais em sua composição. A amostra com 100% de substituição não apresentou nenhuma capacidade de extrusão, mesmo com a adição de água. Foi então decidido que a amostra com 80% de substituição seria utilizada como referência para os testes subsequentes. Nota-se a considerável diferença de textura das camadas de lisa e uniforme para rugosa entre as amostras C10 e C80.



**Figuras 93 e 94** – Teste de impressão da amostra C8

| Granulometria: 1,7 mm - 75µm |                      |                      |             | Temperatura ambiente: 21,75° Umidade: 40% |          |                  |
|------------------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------------------------------------|----------|------------------|
| Composição                   | Resíduo de vidro (%) | Resíduo de vidro (g) | Cimento (g) | Areia (g)                                 | Água (g) | Abaixamento (mm) |
| Ref. 1/2kg                   | 0                    | 0                    | 325         | 175                                       | 106,5    | cilindro 50mm    |
| C10                          | 10%                  | 35                   | 650         | 315                                       | 213      | 4mm              |
| C20                          | 20%                  | 35                   | 325         | 140                                       | 106,5    | 4mm              |
| C30                          | 30%                  | 52,5                 | 325         | 122,5                                     | 106,5    | 3mm              |
| C40                          | 40%                  | 70                   | 325         | 105                                       | 106,5    | 3mm              |
| C50                          | 50%                  | 87,5                 | 325         | 87,5                                      | 106,5    | 2mm              |
| C60                          | 60%                  | 105                  | 325         | 70                                        | 106,5    | 2mm              |
| C70                          | 70%                  | 122,5                | 325         | 52,5                                      | 106,5    | 2mm              |
| Ref. 1kg                     | 0                    | 0                    | 650         | 350                                       | 213      | cilindro 50mm    |
| C80                          | 80%                  | 280                  | 650         | 70                                        | 218      | 2mm              |
| C90                          | 90%                  | 315                  | 650         | 35                                        | 218      | 2mm              |
| C100                         | 100%                 | 350                  | 650         | 0                                         | 218      | 2mm              |

**Tabela 07** - Composições de argamassas para a calibração da substituição de areia por resíduo de vidro

Os testes subsequentes foram realizados para avaliar a substituição dupla, na qual a areia foi substituída por resíduo fino de vidro e o cimento por pó de vidro. As granulometrias adotadas foram de 1,7 mm a 75 µm para o resíduo de vidro e inferiores a 75 µm para o pó de vidro. Inicialmente, testou-se a amostra com substituição máxima de areia (80%) e 30% de pó de vidro em substituição ao cimento, conforme recomendado pela literatura revisada no capítulo anterior, que sugere 30% como o limite para uma atividade pozolânica comprovada. Mantendo a mesma quantidade de água da amostra anterior, essa combinação não foi extrudida com sucesso, como pode ser visto a imagem a seguir, a partir da segunda camada a impressão foi apresentando falhas e foi interrompida.

Na amostra subsequente, a substituição do pó de vidro foi reduzida de 30% para 18%, resultou em extrusão completa, embora com falhas. A primeira camada mostrou-se inicialmente larga e fluida (fig 00), tornando-se gradualmente mais consistente e, em seguida, bastante rugosa. Observou-se que a água na mistura se acumulava no topo do cone da impressora, enquanto o restante do material ficava mais seco, o que pode indicar pouca coesão na mistura.



**Figuras 95 e 96** – Teste de impressão da amostra CPR 80+30



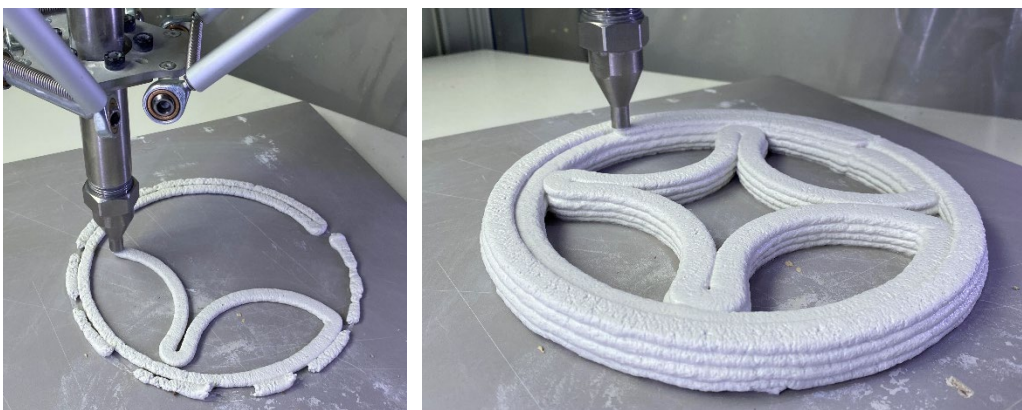
**Figuras 97 e 98** – Teste de impressão da amostra CPR 80+18

| Granulometria: 1,7 mm a 75µm + <75 µm |                 |                      | Temp. amb: 21,65° Umidade: 42,08% |           |          |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------------------|-----------|----------|
| Composição                            | Pó de vidro (g) | Resíduo de vidro (g) | Cimento (g)                       | Areia (g) | Água (g) |
| Ref. 1kg                              | 0               | 0                    | 650                               | 350       | 213      |
| CPR 80+30                             | 195             | 280                  | 455                               | 70        | 218      |
| CPR 80+18                             | 115             | 280                  | 535                               | 70        | 218      |

**Tabela 08** - Composições de argamassas para a calibração da substituição dupla de pó e resíduo de vidro

Durante os testes, verificou-se a necessidade de reduzir a granulometria do resíduo de vidro de 1,7 mm para se aproximar mais da granulometria da areia a ser substituída (< 1 mm), e assim diminuir o esforço requerido pela impressora em relação ao acúmulo de material no bocal da extrusora, já que seu bico possui 8 mm de diâmetro. Como também, melhorar a capacidade de extrusão, considerando o objetivo de minimizar a quantidade de cimento na mistura sem comprometer a impressão.

Na próxima série de ensaios, os resíduos de vidro foram peneirados para uma granulometria para menor que 0,85 mm (tamanho de peneiro disponível após o peneiro de 1,7mm no laboratório) até 75  $\mu$ m. Novas amostras com 100% de substituição da areia por resíduo de vidro com esta nova granulometria foram testadas. As composições mantiveram a proporção de materiais utilizada nos testes anteriores, com 650 g de cimento para 350 g de resíduo de vidro, totalizando 1 kg de material, foi adicionado 5g de água nesta amostra em comparação à anterior. Na primeira camada a extrusão apresentava falhas, o flow teve de ser aumentado na primeira camada e a extrusão obteve sucesso sem interrupções. A peça foi impressa até o final. É possível verificar que as camadas estão mais uniformes e a textura visualmente um pouco menos rugosa.



**Figuras 99 e 100** – Teste de impressão da amostra CPR 100

Com base nesses resultados, decidiu-se repetir a amostra com a substituição total da areia por resíduo de vidro (100%) juntamente com substituição máxima recomendada de 30% de pó de vidro. Foi necessário aumentar o teor de água nessa composição em 10g, verificando-se que as amostras contendo vidro requerem uma quantidade ligeiramente maior de água em comparação com aquelas que utilizam a quantidade máxima de areia na calibração. No entanto, essa amostra não extrudiu adequadamente, com o bico da extrusora entupindo na segunda camada de impressão conforme a figura a seguir.



**Figura 101** – Teste de impressão da amostra CPR 100+30

Para a amostra subsequente, optou-se por utilizar 25% de substituição de pó de vidro e aumentar o teor de água em mais 5g. Essa amostra apresentou uma extrusão satisfatória, sem interrupções, embora tenha sido observado que as argamassas contendo grandes quantidades de resíduos de vidro, sejam eles em pó ou em forma fina, necessitam de mais água em sua composição. Constatou-se que a tentativa de reduzir a quantidade de água nas amostras não foi bem-sucedida, e a proporção de água utilizada acabou se assemelhando à da amostra de calibração da areia produzida no início do processo (Ref.2).



**Figuras 102 e 103** – Teste de impressão da amostra CPR 100+25

| Granulometria: <0,89mm - 75µm + <75 µm |                 |                      | Temperatura ambiente: 20° Umidade: 42% |           |          |
|----------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------------|-----------|----------|
| Composição                             | Pó de vidro (g) | Resíduo de vidro (g) | Cimento (g)                            | Areia (g) | Água (g) |
| Ref. 1kg                               | 0               | 0                    | 650                                    | 350       | 213      |
| CPR 100                                | 0               | 350                  | 650                                    | 0         | 223      |
| CPR 100+30                             | 195             | 350                  | 455                                    | 0         | 233      |
| CPR 100+25                             | 165,5           | 350                  | 487                                    | 0         | 238      |

**Tabela 09** - Composições de argamassas para a calibração da substituição dupla de pó e resíduo de vidro

Somente após a calibração e a definição da quantidade adequada de material para o processo de impressão é que as amostras para os ensaios mecânicos foram selecionadas. Caso esses ensaios tivessem sido realizados antes dessa etapa, seus resultados, embora importantes, poderiam ter sido descartados devido a possíveis ajustes necessários para a calibração e impressão.

### 4.3 Ensaios mecânicos

A resistência mecânica do cimento é a característica mais crucial para seu uso em estruturas, motivo pelo qual todas as normas estabelecem valores mínimos para essa propriedade. Os ensaios mecânicos foram realizados de acordo com a norma EN 196-1:2016, com o objetivo de perceber o quanto o resíduo adicionado impacta nas composições. Foi escolhida a melhor amostra (nominada CPR) após o processo de calibração da impressora para ser comparada com a amostra de referência do cimento (nominada REF). A relação água/cimento para a amostra com adição de resíduo e pó de vidro é ligeiramente maior para manter a trabalhabilidade da argamassa. A tabela a seguir apresenta as quantidades de materiais utilizados na produção dos provetes. Para a realização deste ensaio, foi necessário a utilização de 1,5kg de material para cada tipo de amostra.

| Referência | Cimento (g) | Areia (g) | Pó de vidro (g) | Resíduo de vidro (g) | Água (g) |
|------------|-------------|-----------|-----------------|----------------------|----------|
| REF        | 975         | 525       | 0               | 0                    | 320      |
| CPR 100+25 | 731         | 0         | 244             | 525                  | 350      |

**Tabela 10** - Composições de argamassas para os ensaios mecânicos

Segundo a norma, a resistência à compressão e à flexão é determinada a partir de prismas de 40x40x160 mm (três para cada idade em que se deseja medir a resistência mecânica). Após a mistura dos materiais para garantir homogeneização os provetes foram conservados nos moldes (Figura 104) por um período de 24 horas.

Após este período foram desmoldados imediatamente e colocados submersos para cura em imersão de água até ao momento dos ensaios de resistência (Figura 105). Na data de ensaio, após 28 dias, os provetes foram retirados do seu meio de conservação e ensaiados à flexão, resultando dois meios prismas de cada provete. Em seguida cada meio prisma foi então submetido ao ensaio de resistência à compressão.



**Figura 104** – Preparação dos provetes para ensaios mecânicos



Figura 105 e 106 – Provetes em cura por imersão

### Ensaio de resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, a média aritmética foi calculada a partir de três resultados individuais correspondentes aos três prismas testados. Os resultados encontram-se nas tabelas a seguir.



Figura 107 – Ensaio de resistência à flexão

| Referência do provete | Resistencia à Flexão (Mpa) | Média (Mpa) | Desvio Padrão (Mpa) | Variação (%) |
|-----------------------|----------------------------|-------------|---------------------|--------------|
| REF 1 - P1            | 10,53                      | 10,7        | 0,73                | 6,90%        |
| REF 2 - P2            | 11,50                      |             |                     |              |
| REF 3 - P3            | 10,06                      |             |                     |              |
| CPR 1 - P1            | 8,93                       | 9,29        | 0,32                | 3,40%        |
| CPR 2 - P2            | 9,40                       |             |                     |              |
| CPR 3 - P3            | 9,54                       |             |                     |              |

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão

A resistência à flexão da amostra de referência é ligeiramente superior que a argamassa com adição de pó e resíduo de vidro, com 28 dias, assim como mostra a maioria da literatura previa demonstrada no capítulo anterior. Seriam necessários mais estudos com provetes em outras idades como 90 e 180 dias para avaliar a ocorrência de mudanças e ganho de resistência mecânica para os provetes com adição de vidro, para validar por exemplo, que estas argamassas têm aumento da resistência à flexão à 90 e 180 dias.

### Ensaio de resistência à compressão

Já para o ensaio de resistência à compressão de cada grupo de argamassa foram utilizados os doze provetes resultantes da fissura ocasionada pelo ensaio de flexão. Foi calculado a média aritmética de seis resultados individuais, obtidos a partir de seis medições realizadas em três prismas. Os resultados encontram-se nas tabelas a seguir.



Figura 108 e 109 – Ensaio de resistência à compressão

| Referência do provete | Resistência à Comp. (Mpa) | Média (Mpa) | Desvio Padrão (Mpa) | Variação (%) |
|-----------------------|---------------------------|-------------|---------------------|--------------|
| REF P1.1              | 76,78                     | 76,97       | 4,59                | 6,00%        |
| REF P1.2              | 81,52                     |             |                     |              |
| REF P2.1              | 69,65                     |             |                     |              |
| REF P2.2              | 82,26                     |             |                     |              |
| REF P3.1              | 76,03                     |             |                     |              |
| REF P3.2              | 75,55                     |             |                     |              |
| CPR P1.1              | 64,85                     | 67,31       | 3,76                | 5,60%        |
| CPR P1.2              | 62,45                     |             |                     |              |
| CPR P2.2              | 71,95                     |             |                     |              |
| CPR P2.2              | 64,83                     |             |                     |              |
| CPR P3.1              | 69,74                     |             |                     |              |
| CPR P3.2              | 70,05                     |             |                     |              |

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão

No que se refere à resistência à compressão, os provetes de referência têm valores ligeiramente maiores que os provetes com adição de pó e resíduo de vidro.

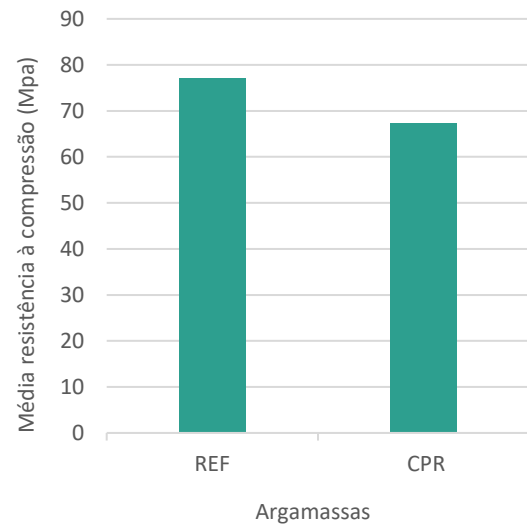
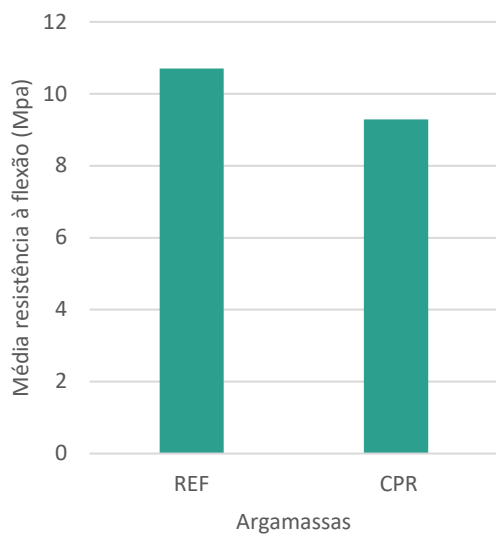


**Gráfico 05 e 06** – Média dos resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão

## **5. Desenvolvimento do produto e impressão do material**

Neste subcapítulo final, será discutido o processo de desenvolvimento do produto utilizando o material previamente elaborado. Embora o produto tenha passado por diversas variações em sua forma, sua aplicação permaneceu consistente, sendo projetado para uso arquitetônico, com a finalidade de atuar como painel, parede, divisória, cobogó ou elemento ornamental.

Foram desenvolvidas diversas opções com foco na exploração formal, inspiradas em um design orgânico que busca referência na natureza, tanto nas formas quanto no uso de materiais biodegradáveis ou reutilizáveis. As ondulações do fundo dos oceanos e o movimento da água serviram como inspiração principal. Era fundamental que o objeto apresentasse certa complexidade geométrica, a fim de demonstrar as possibilidades oferecidas pela impressão 3D. Simultaneamente, foram consideradas as limitações desse processo, como a escala do objeto, restringida pelo tamanho da impressora e pelo próprio processo de impressão. Diversas versões foram impressas, com validação e ajustes constantes na forma, buscando um equilíbrio entre a funcionalidade e o apelo visual do objeto.

### **5.1 Conceito**

Foi realizada uma pesquisa para buscar referências visuais que orientassem o desenvolvimento do produto. Foram elaborados painéis de referências visuais, explorando formas orgânicas e da natureza, bem como estudos de impressões 3D e elementos escultóricos. Além disso, foram elaborados painéis de referências de função, com elementos e painéis de fachada e suas aplicações práticas. O objetivo é que a peça criada tenha um uso duplo: funcionar tanto como um cobogó, elemento vazado destinado a melhorar a iluminação, ventilação e controle térmico, quanto como um tijolo empilhável e com isso evidenciando suas formas onduladas, com a possibilidade de incorporar iluminação e vegetação, devido ao seu design.

O cobogó é um elemento arquitetônico modular, geralmente vazado, amplamente utilizado em construções para permitir a passagem de luz e ventilação natural, ao mesmo tempo que proporciona privacidade e controle térmico. Sua origem utilizando o concreto foi assim batizada pelos seus criadores que buscaram a patente da invenção em 1929, em Recife, Pernambuco, a partir das iniciais de seus sobrenomes, CO-BO-GÓ: Amadeu Oliveira Coimbra, Ernest August Boeckmann e Antônio de Góes (VIEIRA, 2012). Criado em Recife, cidade da autora, sua aplicação combina funcionalidade e estética, integrando-se a fachadas, divisórias e painéis. Solução inspirada pela arquitetura árabe, e tradicionalmente fabricado em materiais como concreto, cerâmica ou vidro, o cobogó é uma solução eficiente em climas quentes, promovendo a circulação de ar e o sombreamento. Além de seu aspecto utilitário, o cobogó também assume um caráter decorativo,

enriquecendo os espaços com suas formas geométricas e padrões variados. Abaixo, a imagem da caixa de água da cidade de Olinda, no estado de Pernambuco, edifício no qual foi utilizado pela primeira vez o cobogó como elemento arquitetônico pelo arquiteto Luiz Nunes, além do pavilhão de verificação de óbitos, do mesmo arquiteto.



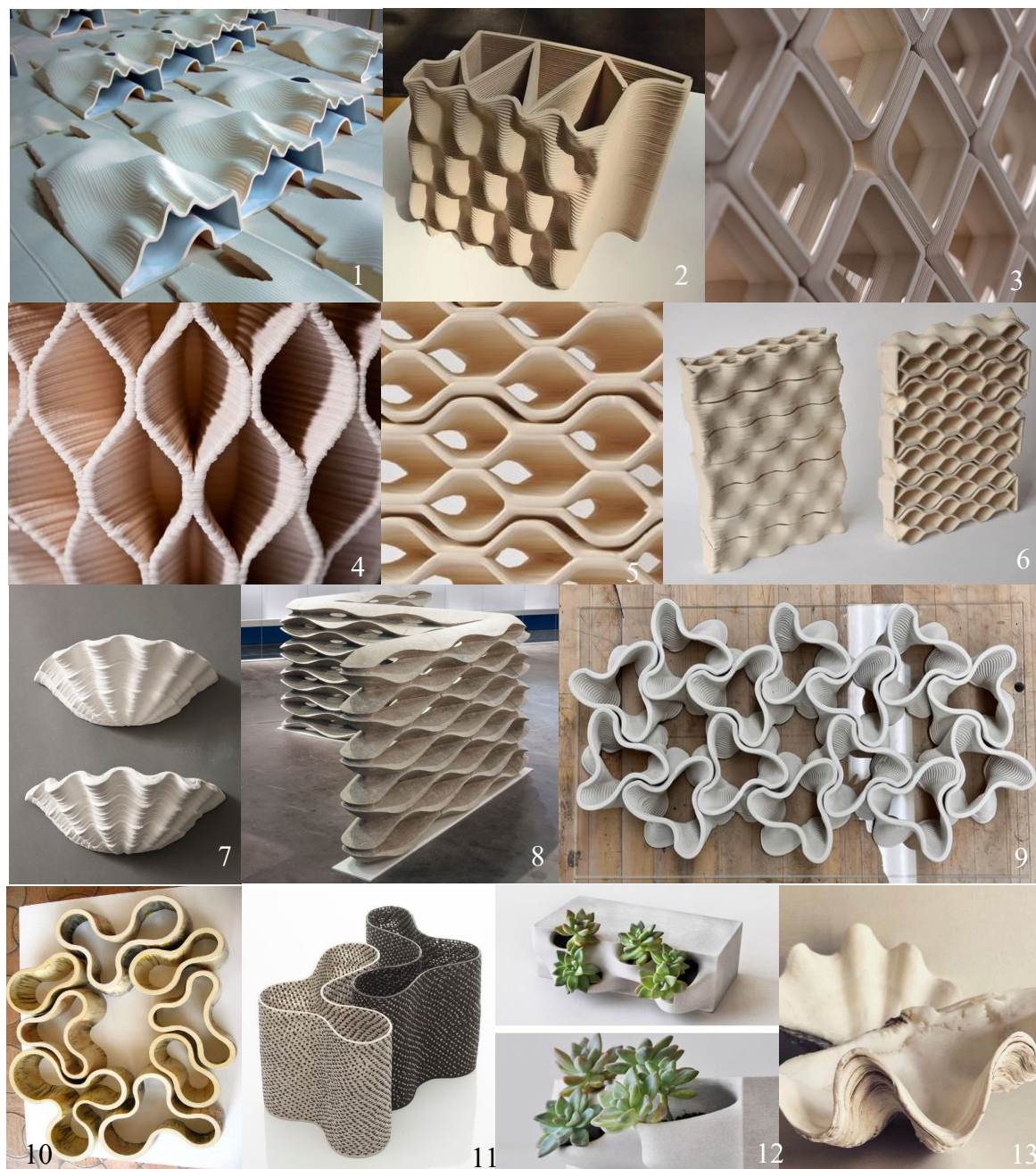
**Figura 110** – A caixa de água de Olinda, Brasil à esquerda; e o Pavilhão de Verificação de Óbitos, à direita. Arquiteto Luiz Nunes (Brazil Builds 1943)

### 5.1.1 Painéis de referências visuais



**Figura 111** – Pannel com imagens de referência de formas orgânicas da natureza.

(imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest.com 1. Stock Adobe 2. Ileana Makri 3. Dennis Fox 4. Yosemite photography 5. Jason Leung 6. Loren Mooney 7. Poppo.com 8. Frrepik.com 9. Zicxa 10. Jack Dykinga 11. Juan Francisco Moreno Gamez 12. Kristin Breiseth 13. Shutterstock 14. Etsy.com 15. Dfishman 16. Gianluca Milella 17. Mark Sewell Flickr 18.



**Figuras 112** – Pannel com imagens de referência de impressões 3D e outras esculturas com formas orgânicas

(imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest.com 1. *Radical Craft / Joshua Stein* 2. *architektura.muratorplus.pl* 3. *Bat El Hirsh* 4. *Unfold Design Studio* 5. *Brian Peters* 6. *Brian Peters* 7. *Liz O'brien* 8. *Lithos Design* 9. *Behnaz Farahi, CSU* 10. *Richard deacon, Marian Goodman Gallery* 11. *Lut Laleman* 12. *Emerging Objects* 13. *Le Journalle*)

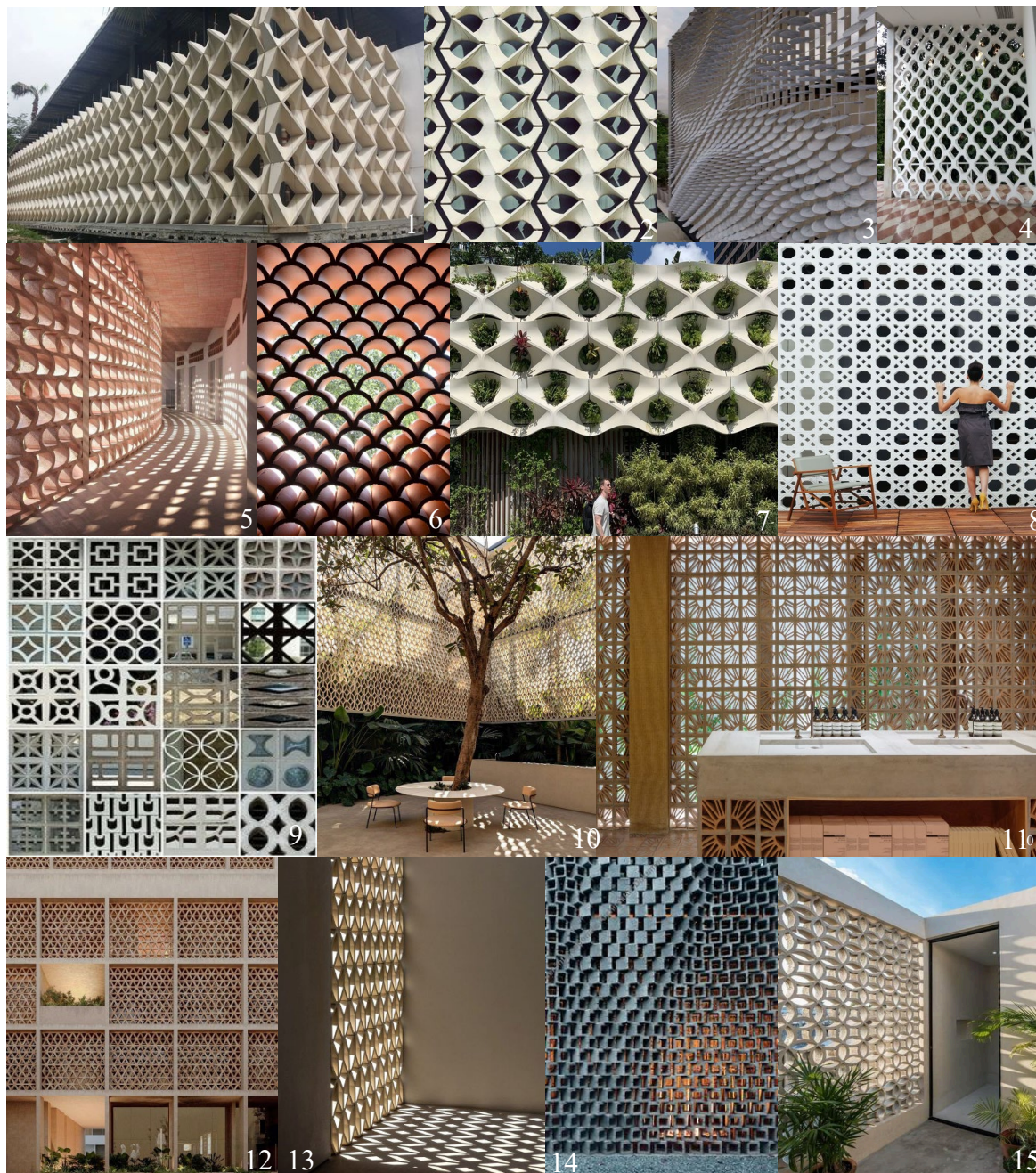


**Figura 113** – Painel com imagens de referência de Cobogós e fachadas perfuradas

(imagens retiradas do banco de imagens do Pinterest e disponíveis no Pinterest.com 1. Pinterest.com/database 2. Rudolf Weber Design Wanted 3. Metaguiuse.com 4. Instituto Moreira Sales 5. Manuel Herz Arquitectos 6. Yoan Claveau de Lima 7. Garden Restroom / LAAB Architects 8. CasaAbril.com.br 9. SW Walsh Flickr 10. Studio Arthur Casas 11. Capana Brothers 12. Ozu estudio 13. Fran Parente, Studio Arthur Casas 14. Sheng Zhonghai 15. Manolo R Solís

## 5.2 Estudos da Forma e modelagem

Após a fase experimental, na qual foram avaliadas as propriedades do material, procedeu-se a uma análise das referências projetuais previamente apresentadas, com o objetivo de selecionar as formas que melhor se adequassem às peças a serem impressas, levando em consideração as características dos materiais desenvolvidos. Durante esse processo, foram considerados fatores como textura, padrões criados e o peso do material. A seguir, primeiros exemplos da exploração de formas sinuosas, mas ao mesmo tempo mantendo uma geometria de bloco convencional, que foram impressas e posteriormente foram descartadas.

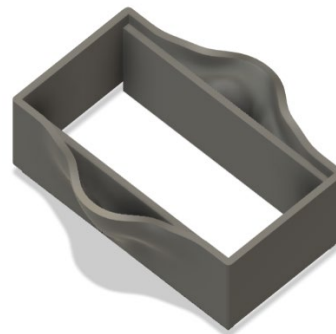
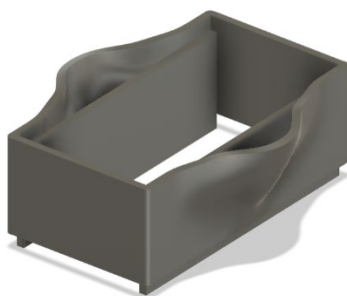
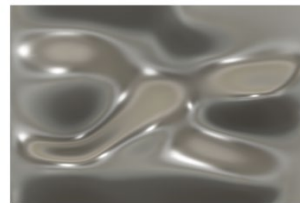
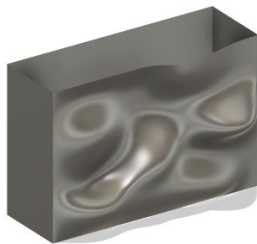
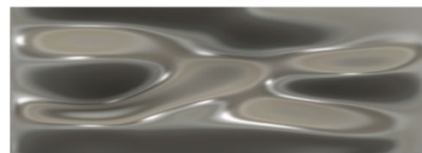


**Figura 114** – Modelos desenvolvidos com Autodesk Fusion de explorações da forma inspiradas nas ondulações da água

### 5.3 Prototipagem

As formas previamente apresentadas foram submetidas ao processo de impressão e validação de geometria, ao total três peças foram impressas, as duas primeiras com uma mistura de cimento, areia e água, sendo a terceira e última uma com a mistura selecionada de pó e resíduo de vidro. Neste momento, o objetivo era obter uma peça que combinasse características orgânicas e geométricas ao mesmo tempo, permitindo seu empilhamento para formar, por exemplo, uma parede. Nesse estágio, os encaixes foram planejados exclusivamente para o empilhamento, e a peça foi concebida para acomodar plantas e iluminação, a depender de sua configuração. O bloco resultante apresentou um peso considerável, dado seu tamanho de 30x10x10 cm. Embora a simplicidade da peça visasse facilitar um processo de impressão menos complexo, o design foi posteriormente descartado por não apresentar complexidade suficiente para justificar a impressão 3D, podendo ser mais adequadamente produzido por meio de um molde convencional. Algumas questões foram observadas e melhoradas.

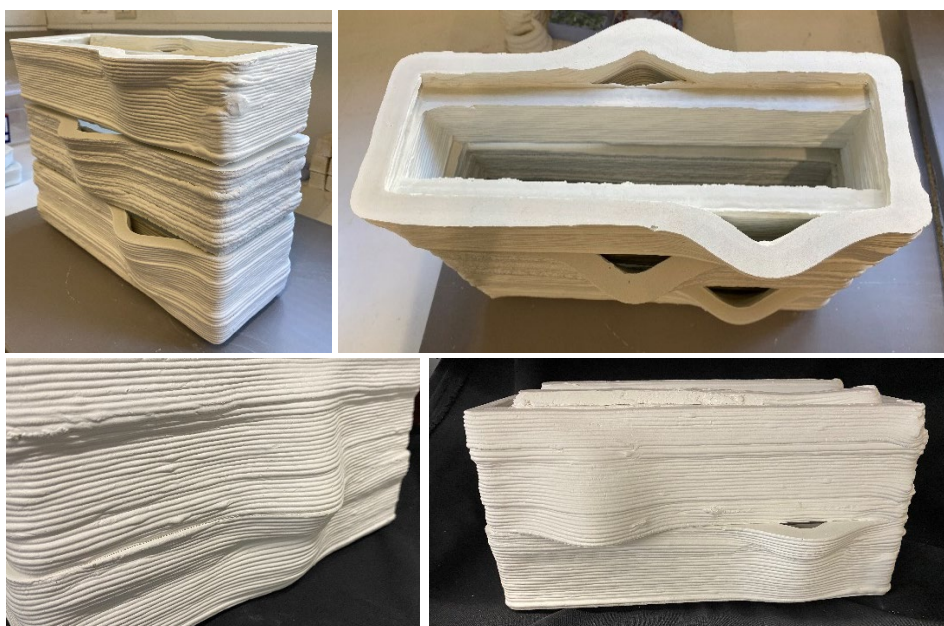


**Figura 115** – Modelos impressos em cimento e com a mistura selecionada.

Embora essas peças tenham sido descartadas, o processo de impressão foi fundamental para validar e revisar algumas decisões que posteriormente contribuíram para o sucesso da impressão final. Um exemplo foi o entupimento do bocal da impressora devido à alimentação excessiva de material de uma só vez, o que levou à conclusão de que seria necessário produzir o material em etapas menores. Além disso, a redução do tamanho e, conseqüentemente, do peso da estrutura facilitaria o processo seguinte. A estrutura de encaixe também teve de ser revista, eliminando a necessidade de suporte para a impressão da primeira camada, que correspondia ao encaixe negativo.

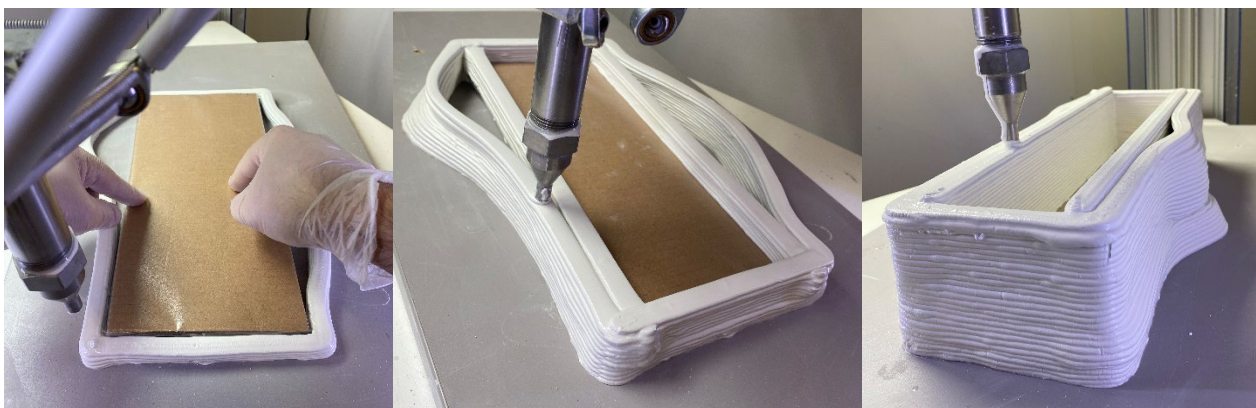


**Figura 116** – Modelos impressos em cimento, areia e água.

Além disso, o caminho de impressão revelou-se inadequado para o processo, resultando em movimentos desnecessários e interrupções, o que ocasionou o acúmulo de material em determinadas áreas, prejudicando a estética da peça. Esse aspecto foi identificado como um fator crucial a ser considerado para o desenho da peça na próxima fase de impressão.



**Figura 117** – Modelo impresso com acúmulo de material nos cantos

É possível perceber nas figuras abaixo, a diferença de textura entre a peça à esquerda, sem a adição de material, e a peça à direita, com a adição de vidro, mostrando uma textura áspera e um pouco grosseira.



**Figura 118** – Modelos impressos sem e com a adição de vidro.

## 5.4 Modelação final

Com base nas questões levantadas no processo anterior, a peça foi redesenhada levando em consideração os problemas de impressão observados. O novo modelo foi desenvolvido com um caminho de impressão simplificado e contínuo, de modo a permitir uma impressão ininterrupta e em espiral. Foram também considerados a curvatura e a angulação máximas para evitar o colapso da peça durante a impressão. O design resultante foi pensado para funcionar tanto como um cobogó quanto como um painel empilhável, destacando as ondulações formadas pela sobreposição de dois cones e dois cilindros. A estrutura interna em linha serve para dar suporte às paredes internas e dar continuidade à impressão.



Figura 119 – Modelação da peça final a ser impressa

## 5.5 Simulação de painel



**Figura 120** – Modelação das peças arranjadas em painel.

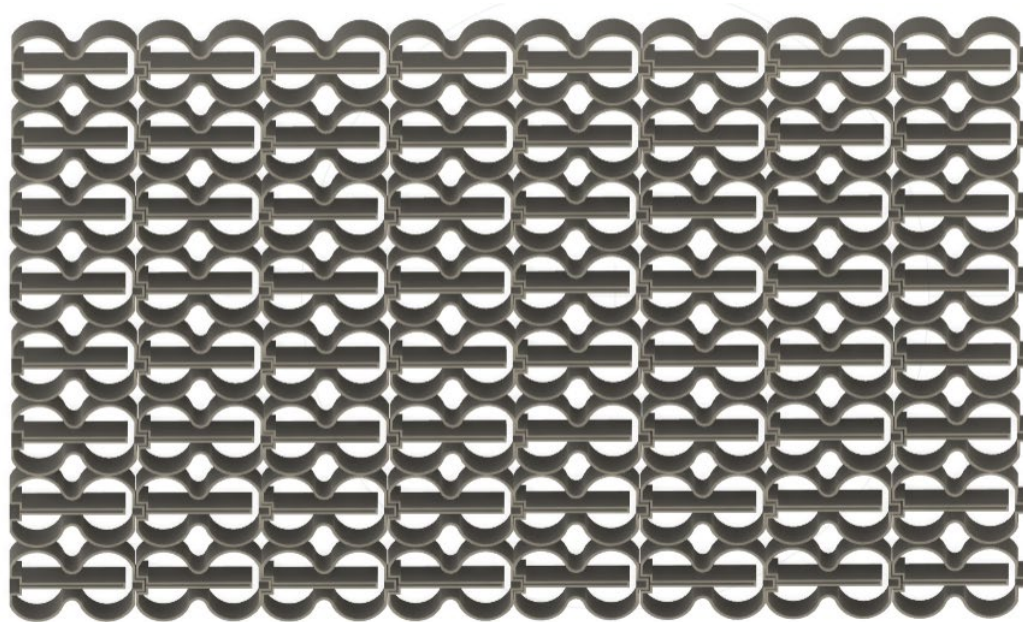


**Figura 121** – Modelação das peças arranjadas em painel em forma de Cobogó

## 5.6 Impressão

Após os ajustes realizados no modelo, procedeu-se à validação da forma e à impressão final. Foi desenvolvido um modelo de dimensões reduzidas em relação à peça anterior, com medidas de 25x10x10 cm. Assim como na impressão anterior, a modelagem foi realizada no software Fusion, sendo o arquivo traduzido para G-code utilizando o software Grasshopper, com a finalidade de viabilizar a impressão. A impressão ocorreu com uma velocidade de 10 mm/s, um fluxo (flow) de 133, diâmetro do bocal da impressora de 8 mm e largura de extrusão de 6,5 mm. Optou-se por uma peça com um número reduzido de camadas, visando acelerar o processo de impressão.

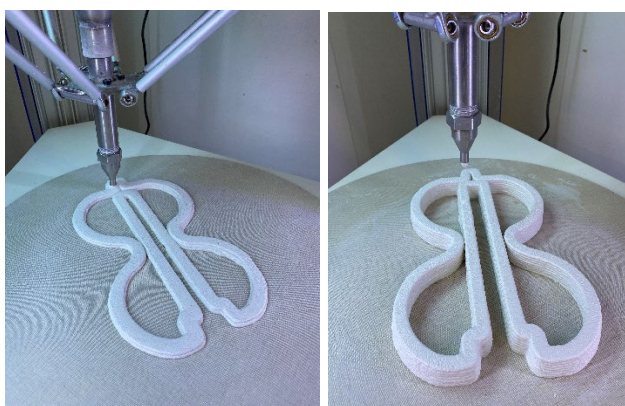


Figura 122 – Validação da forma e impressão das peças finais

Quatro peças foram impressas utilizando a composição selecionada (CPR 100+25), que consiste em 100% de substituição da areia por resíduo fino de vidro e 25% de substituição do cimento por pó de vidro. Para cada peça, foi preparada uma composição de 1 kg de material, repetida quatro vezes para alimentar a impressora ao longo do processo, totalizando 4 kg de material seco por peça. Essa mistura já havia sido validada durante a fase de calibração da impressora e na primeira validação da forma, sendo agora utilizada para a impressão das peças finais. Para cada peça, foram utilizados aproximadamente 662 g de pó de vidro, 1.400 g de resíduo de vidro, 1.948 g de cimento e cerca de 952 g de água.

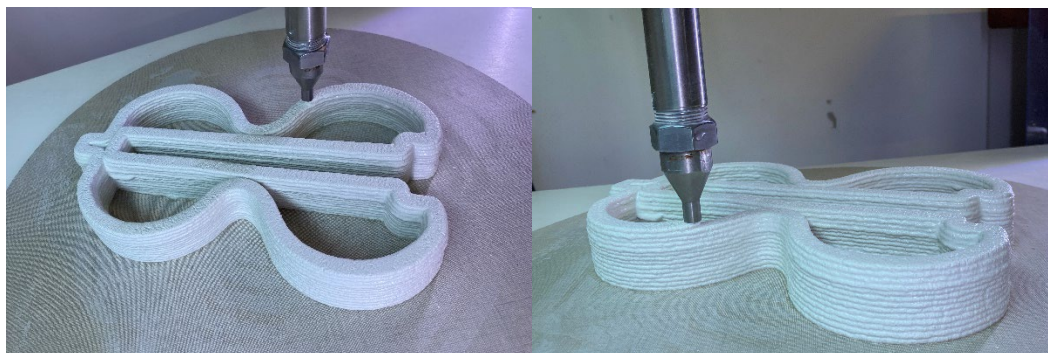


Figura 123 – Validação da forma e impressão das peças finais.

Durante a impressão, diversas estratégias foram adotadas em relação à experiência anterior. Foram realizadas pausas regulares para a limpeza do bocal da extrusora, que era removido e lavado para evitar o acúmulo de material seco nas laterais. Paralelamente, material "fresco" era preparado conforme o material na impressora se esgotava. Apesar desses ajustes, a impressão foi bem-sucedida, com camadas bem definidas e distintas. Essas estratégias demonstraram ser eficazes na superação das restrições inerentes ao processo de impressão, incluindo limitações de tempo, simplicidade do design da peça e desafios na modelação de formas mais complexas. Em termos gerais, sem a adoção dessas estratégias, o processo de impressão teria enfrentado maiores dificuldades, especialmente com relação à secagem do material dentro da impressora e ao acúmulo de água na base do funil, por conta de haver tempos de espera no abastecimento de material na impressora. Se a impressora fosse alimentada gradualmente com o recurso de uma bomba, estas dificuldades poderiam ser evitadas. No entanto, fora esses desafios, o material não apresentou problemas significativos, tendo a composição sido desenvolvida desde a fase de calibração para garantir uma boa impressão e atender aos parâmetros essenciais. A seguir serão mostradas propostas de aplicação desta peça desenvolvida.

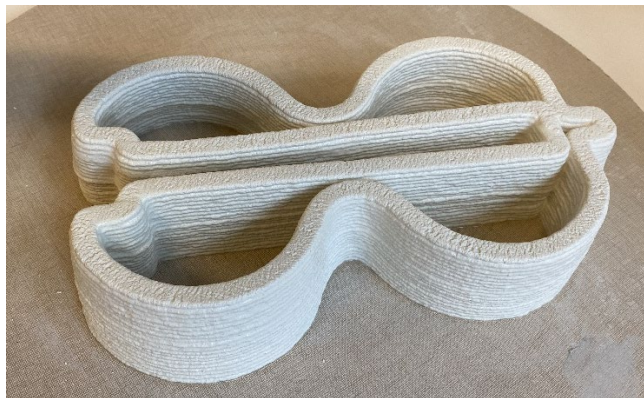


**Figura 124** – Validação da forma e impressão das peças finais

## 5.7 Proposta final de aplicação do produto

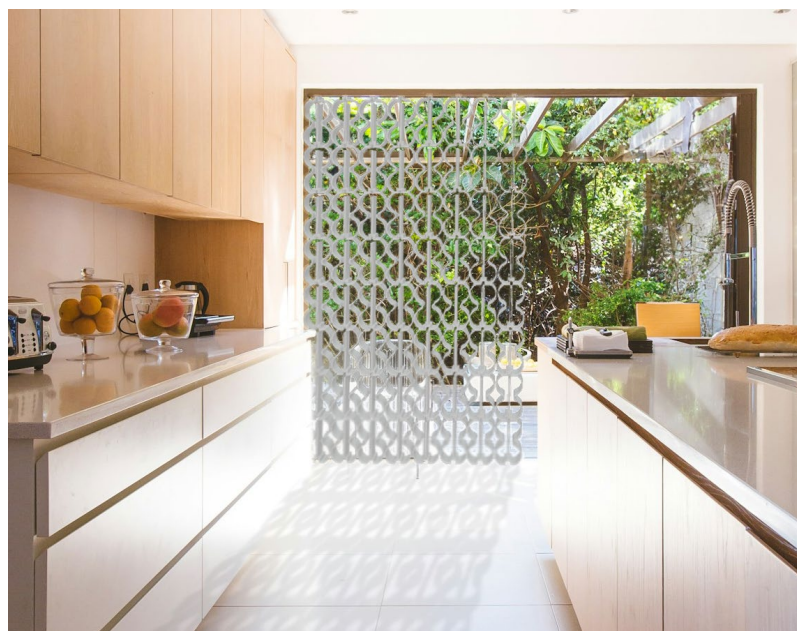


**Figura 125** – Montagem de aplicação da peça em forma de cobogó  
(Imagem de fundo retirada de banco de imagens splash.com)

## 5.8 Produto

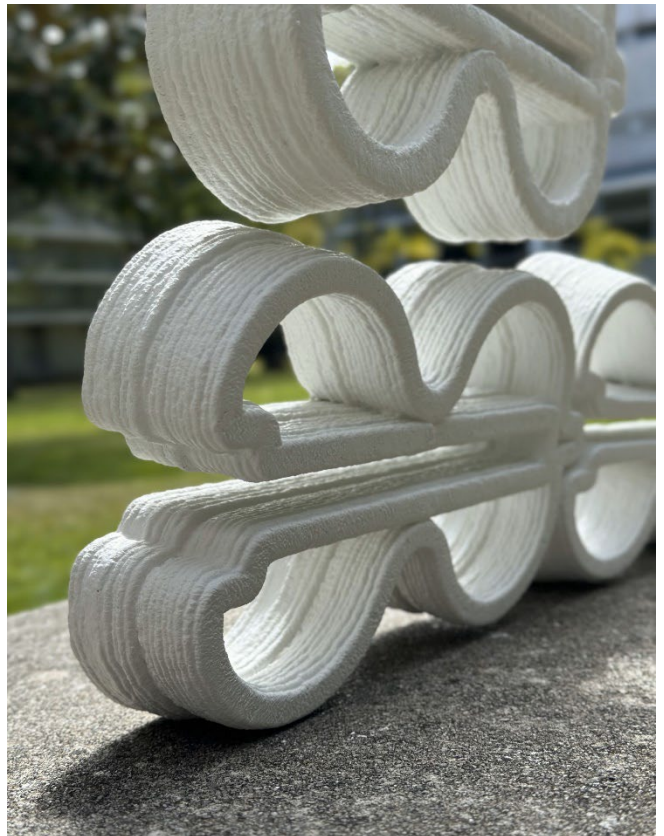














## IV. Considerações Finais

### 1. Conclusão

Nos últimos anos, o rápido desenvolvimento e progresso contínuo da impressão em 3D proporcionaram uma nova perspectiva para a indústria tradicional da construção. Diferente do método convencional de moldagem, a técnica de impressão 3D de argamassas cimentícias permite a fabricação de estruturas de concreto e cimento por meio da deposição de camadas sucessivas com base na extrusão. Essa tecnologia emergente apresenta várias vantagens em relação ao método de moldagem, como a possibilidade de criar estruturas com geometria complexa, menor dependência de mão de obra e aumento da produtividade na fabricação (J. Liu et al., 2022)

Este trabalho teve como ponto de partida a investigação do uso de resíduos de vidro em argamassas cimentícias, com foco na sua aplicação em impressão 3D. O estudo buscou compreender a composição, os tipos, a produção industrial, o uso e o descarte do vidro, evidenciando que, embora o vidro represente um problema de descarte em aterros, ele possui um ciclo de vida altamente vantajoso. Na literatura o vidro demonstrou potencial como material pozolânico eficaz na substituição parcial do cimento, destacando-se por sua contribuição para a sustentabilidade, principal objetivo deste estudo, que abrange tanto o uso de resíduos quanto a adoção de manufatura aditiva, um processo promissor por minimizar a geração de resíduos. Importante ressaltar que o foco deste trabalho não se limitou ao design de uma peça final, mas à compreensão abrangente das propriedades do material.

Os testes realizados buscaram uma composição que maximizasse o uso de resíduos de vidro, mantendo as características necessárias para uma impressão satisfatória. A indústria da construção surge como campo de aplicação promissor para o vidro reciclado, devido à semelhança das propriedades físicas e químicas do vidro com as das matérias-primas do concreto, como o cimento e a areia de rio. Embora os efeitos do vidro reciclado nas propriedades mecânicas do concreto moldado tenham sido amplamente investigados na literatura, este estudo indicou a necessidade de mais pesquisas sobre o comportamento mecânico do material impresso com um tempo maior de cura, a fim de avaliar seu ganho ou perda de resistência. Diversos fatores, como o tamanho, a textura da superfície e a forma das partículas de vidro, influenciam significativamente as propriedades das argamassas cimentícias. Conclui-se que após a diminuição da granulometria dos resíduos de vidro, substituintes da areia, para menores que 1mm, as capacidades de extrusão das argamassas foram melhoradas.

Entre os desafios enfrentados estão a quantidade limitada de material processado (britagem, moagem e crivagem) para a obtenção do pó. Isso faz com que a obtenção de material suficiente com uma granulometria ainda mais baixa seja mais dificultosa. Um outro desafio é o controle da reação álcali-sílica (ASR) sem a realização de testes que possam atestá-la. Se sabe que a ARS pode causar fissuras internas no cimento, pois é condicionado pelo tamanho das partículas de vidro. Assim, o uso desse material para fins estruturais ainda não é recomendado, mas sua aplicação em elementos arquitetônicos, como fachadas e no design de produtos, é viável. Em relação aos agregados de vidro utilizados para a substituição de areia natural foram condicionados pela impressora, que não permitiu o uso de partículas maiores. Porém, a decisão de diminuir a granulometria destes agregados em relação à areia melhoraram a capacidade de extrusão.

Conclui-se que o material e o produto desenvolvidos atingiram os objetivos da pesquisa, que envolviam a valorização de resíduos para a criação de um novo material apto para impressão 3D. Foi observado que o uso do material para outras aplicações além da impressão 3D poderia ser ainda mais vantajoso, uma vez que demandaria menor quantidade de cimento. A composição utilizada priorizou o sucesso da extrusão, mesmo com maior uso de cimento, sugerindo que há potencial para o desenvolvimento de produtos com resíduos como material complementar ao cimento ou à areia.

A avaliação do impacto ambiental da produção e aplicação de argamassa com vidro reciclado envolve a análise do ciclo de vida do material, considerando as etapas desde a extração de matérias-primas até o descarte. Comparando com métodos convencionais, o uso de vidro reciclado como substituto parcial de agregados naturais e cimento reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia, uma vez que o processo de fabricação do cimento é altamente poluente. Além disso, a reutilização de resíduos de vidro diminui a exploração de recursos naturais, como a areia, e contribui para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Esta análise, ao comparar o ciclo de vida de ambas as alternativas, mesmo o levando em conta o processo de transformação do vidro em pó, destaca a eficiência ambiental da argamassa com vidro reciclado, promovendo sua viabilidade como uma solução mais ecológica para a construção civil.

## 2. Limitações e melhoramentos futuros

Este trabalho pode ser ampliado para um desenvolvimento mais abrangente, especialmente no que diz respeito a testes mais completos, com o objetivo de avaliar suas propriedades para aplicações além do campo do design. Nesse sentido, alguns aspectos poderão ser abordados em estudos futuros:

1. Ensaio adicionais: É recomendável a realização de testes de resistência com amostras aos 90 e 180 dias, a fim de analisar o comportamento mecânico da composição dupla utilizada. Além disso, testes de absorção de água deverão ser realizados, com o intuito de explorar outras possíveis aplicações para esse material e resíduos, além de investigar o uso combinado com outros tipos de resíduos.
2. Melhoria da argamassa: A formulação da argamassa pode ser aprimorada com a introdução de superplastificantes, visando reduzir a quantidade de água necessária, o que poderia resultar em um material de melhor desempenho.
3. Otimização de design e geometria: A utilização de softwares de design paramétrico, como o Grasshopper, pode contribuir significativamente para o aprimoramento do design e da geometria das peças, tornando-as mais sofisticadas ao aliar forma e função de maneira mais elegante. Esse tipo de software poderá permitir uma exploração mais detalhada da textura durante o processo de impressão.
4. Avaliação do ciclo de vida: A análise do ciclo de vida do material e do uso da impressora 3D é fundamental para determinar a viabilidade desse processo em larga escala. Essa avaliação ajudaria a identificar quais tipos de aplicação compensariam e se a industrialização do processo é uma opção viável.

Esses pontos representam direções promissoras para a continuidade do estudo, visando uma aplicação mais ampla e sustentável do material e da tecnologia de impressão 3D.

## Referências Bibliográficas

- Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, 118, 103268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>
- Andrew, R. (2019). Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data Discussions*, 1–67. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-152>
- Associação de Reciclagem dos Resíduos de Embalagens de Vidro. (sem data). Reciclagem do Vidro. CERV. Obtido 23 de julho de 2024, de <https://cerv.pt/reciclagem-do-vidro/>
- Basto, P., Jr, H., & Neto, A. (2019). Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103410. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103410>
- Bauer, L. A. F. (2008). *Materiais de Construção* (5ª Edição, Vol. 2). LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Biomimicry Institute. (2024). Chapter One of Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. *Biomimicry Institute*. <https://biomimicry.org/chapterone/>
- Carton, A. (2024, março 18). Glass for Europe updates its paper on the recycling of end-of-life building glass. *Glass for Europe*. <https://glassforeurope.com/glass-for-europe-updates-its-paper-on-the-recycling-of-end-of-life-building-glass/>
- Chiusoli, A. (2021, janeiro 21). *3D printed house TECLA - Eco-housing*. 3D Printers | WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>
- Circular economy action plan—European Commission*. (sem data). Obtido 3 de setembro de 2024, de [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- Corinaldesi, V., Nardinocchi, A., & Donnini, J. (2016). Reuse of recycled glass in mortar manufacturing. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20, s140–s151. Scopus. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1246695>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- Dini. (2024). *3D Printing Technology*. <https://d-shape.com/3d-printing/>
- Donaldson, K. (2023, novembro 29). *Studio RAP uses 3D-printed tiles for facade informed by knitwear*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2023/11/29/rap-studio-3d-printed-ceramic-tiles-facade-rippling-textile/>

- Dreith, B. (2024, março 12). *ICON develops 3D printer to build enclosed multi-storey structures*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2024/03/12/icon-phoenix-3d-printer-multi-story-structures/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- Emerging Objects. (2015). *Bloom | Emerging Objects*. <https://emergingobjects.com/project/bloom-2/>
- Emerging Objects. (2018). *Cabin of 3D Printed Curiosities | Emerging Objects*. <https://emergingobjects.com/project/cabin-of-3d-printed-curiosities/>
- Environment Programme, U. N. (2022, setembro 11). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. UNEP - UN Environment Programme. <http://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- ETH ZÜRICH. (2019, novembro 26). <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/11/glass-from-a-3d-printer.html>
- FEVE. (2023, junho 29). *EU's glass value chain confirms glass collection rate steady progress at 80.1%*. FEVE The European Glass Container Federation. <https://feve.org/eu-glass-value-chain-80-collection-rate/>
- Gao, J., & Fourie, A. (2015). Spread is better: An investigation of the mini-slump test. *Minerals Engineering*, 71, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.001>
- Giacomini, E. (2007). *Caixilharias exteriores para edifícios: Contributo para a melhoria da sua especificação*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/57727>
- Glass for Europe. (sem data). Flat glass market. *Glass for Europe*. Obtido 31 de março de 2024, de <https://glassforeurope.com/the-sector/key-data/>
- Glass—European Commission. (sem data). Obtido 30 de março de 2024, de [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/related-industries/non-metallic-products-and-industries/glass\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/related-industries/non-metallic-products-and-industries/glass_en)
- ICON. (2024). *Our Projects*. ICON. <https://www.iconbuild.com/projects>
- Incremental3d. (2021). Incremental3d. <https://www.incremental3d.eu/projects.html>
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>
- James, P. (2021, abril 23). *Mario Cucinella Architects and WASP creates 3D-printed sustainable housing prototype*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2021/04/23/mario-cucinella-architects-wasp-3d-printed-housing/>

- Jochem, L. F., Casagrande, C. A., Onghero, L., Venâncio, C., & Gleize, P. J. P. (2021). Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. *Construction and Building Materials*, 273, 121704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121704>
- 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*, in press.
- Khan, Md. N. N., Saha, A. K., & Sarker, P. K. (2020). Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 28, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101052>
- Khmiri, A., Chaabouni, M., & Samet, B. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, 44, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Li, Q., Qiao, H., Li, A., & Li, G. (2022). Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. *Construction and Building Materials*, 324, 126531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>
- Lima, G. da C. (2003). O discurso da sustentabilidade e suas implicações para a educação. *Ambiente & Sociedade*, 6, 99–119. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2003000300007>
- Liu, J., Li, S., Gunasekara, C., Fox, K., & Tran, P. (2022). 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. *Construction and Building Materials*, 314, 125561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125561>
- Liu, S., Wang, S., Zhou, W., Li, L., Xiao, H., Wei, J., & Tang, W. (2016). Strength and microstructure of mortar containing glass powder and/or glass aggregate. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(6), 1302–1310. <https://doi.org/10.1007/s11595-016-1531-4>
- Lu, J., Duan, Z., & Poon, C. S. (2017a). Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. *Cement and Concrete Composites*, 82, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.011>
- Lu, J., Duan, Z., & Poon, C. S. (2017b). Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. *Construction and Building Materials*, 131, 793–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.011>
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., & Liu, Y. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609–12624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012>
- Lyu, F., Zhao, D., Hou, X., Sun, L., & Zhang, Q. (2021). Overview of the Development of 3D-Printing Concrete: A Review. *Applied Sciences*, 11(21), Artigo 21. <https://doi.org/10.3390/app11219822>

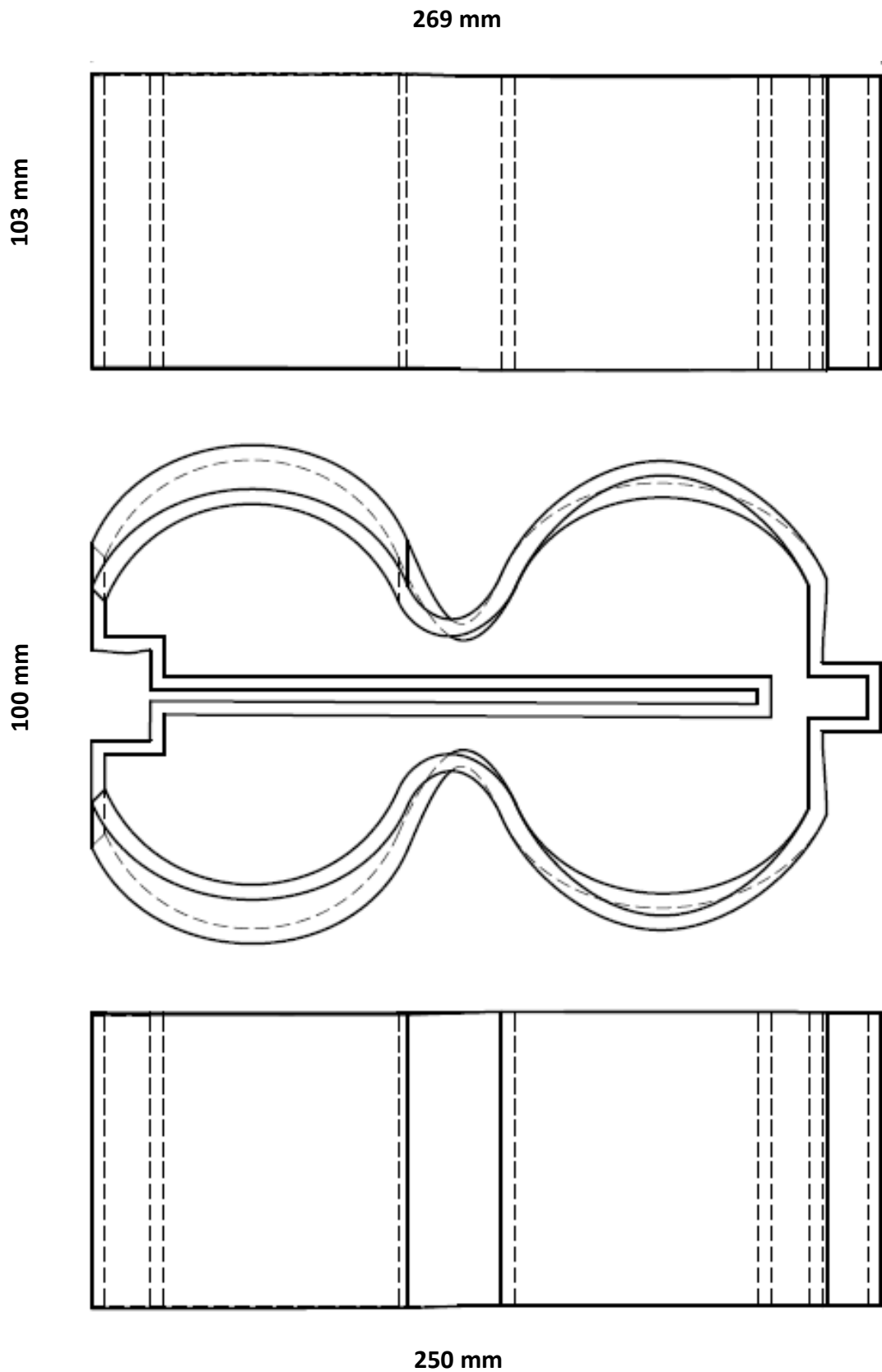
- McDonough. (2002). *Cradle to Cradle*. William McDonough. <https://mcdonough.com/cradle-to-cradle/>
- Mercado Rivera, F. J., & Rojas Arciniegas, A. J. (2020). Additive manufacturing methods: Techniques, materials, and closed-loop control applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1), 17–31. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05663-6>
- MIT Mediated Matter. (2014). MIT Media Lab. <https://www.media.mit.edu/projects/g3p/overview/>
- Morais, A. et al. (2022). Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. *Periodikos*. <http://www.ceramicaindustrial.org.br/doi/10.4322/cerind.2022.008>
- NTU. (2022, abril 26). *Recycled glass waste replaces sand in 3D printing*. Corporate NTU. <https://www.ntu.edu.sg/news/detail/recycled-glass-waste-replaces-sand-in-3d-printing>
- Oliveira, R., de Brito, J., & Veiga, R. (2015). Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 95, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.049>
- Panda, B., Noor Mohamed, N. A., Paul, S. C., Bhagath Singh, G. V. P., Tan, M. J., & Šavija, B. (2019). The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. *Materials*, 12(13), Artigo 13. <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
- Papanek, V. J. (1984). *Design for the real world: Human ecology and social change*.
- Parghi, A., & Shahria Alam, M. (2016). Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). *Construction and Building Materials*, 104, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.006>
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5(5), 427–437. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5)
- Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S. (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>
- Portugal reciclou menos 6.200 toneladas de vidro em 2023. *Indústria pede medidas urgentes*. (sem data). Obtido 23 de julho de 2024, de <https://www.jornaldenegocios.pt/economia/ambiente/detalhe/portugal-reciclou-menos-6200-toneladas-de-vidro-em-2023-industria-aponta-dedo-a-spv-e-novo-verde>
- Provencher Roy. (2024). *Darwin Bridges*. Provencher\_Roy | Architecture - Design - Urbanisme - Paysage. <https://provencherroy.ca/en/projects/darwin-bridges/>

- Radwan, M. K. H., Mo, K. H., Onn, C. C., Ng, C. G., & Ling, T.-C. (2021). Waste press mud in enhancing the performance of glass powder blended cement. *Construction and Building Materials*, 313, 125469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125469>
- Ravenscroft, T. (2023, junho 29). *New Delft Blue archways wrapped in 3,000 unique 3D-printed ceramic tiles*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2023/06/29/new-delft-blue-3d-printed-ceramic-archway-studio-rap/>
- Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Cacedo, M. A., & Delvasto Arjona, S. (2023). 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, 146, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- Salamon, V. (2024, junho 27). The EU's glass value chain sustains a steady 80.2% glass packaging collection rate with record volume of collected glass! - Close The Glass Loop. *Close The Glass Loop - We share a common European ambition to collect more and better glass, together*. <https://closetheglassloop.eu/press-release-2022-glass-packaging-collection-rate/>
- Santos, M., Lamego, P., & Frade, P. (2017). Management Options for Construction and Demolition Wastes from Residential Recuperation. *Waste and Biomass Valorization*, 8. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9675-1>
- Severi, A. (2024, março 11). *3D printed cooling system in ceramic | TerraMound*. 3D Printers | WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-cooling-system-in-ceramic-terramound/>
- Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968>
- Teixeira, J. H. S. (2018). *Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/117813>
- Thomas, M. (2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>
- Ting, G. H. A., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2021). Experimental measurement on the effects of recycled glass cullets as aggregates for construction 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, 300, 126919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126919>
- TU Eindhoven. (2021, setembro 8). TU Eindhoven. <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/01-01-1970-nijmegen-has-the-longest-3d-printed-concrete-bicycle-bridge-in-the-world>
- Vezzoli, C. A., & Manzini, E. (2008). *Design for Environmental Sustainability*. Springer Science & Business Media.
- VIEIRA, A. (2012). *Cobogó de Pernambuco* (1.<sup>a</sup> ed.).
- WASP. (2022). *3d Printer House | Crane WASP*. 3D Printers | WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>

- WASP. (2024). *Giant 3d printer | BigDelta WASP 12MT 3D Printers | WASP. 3D Printers | WASP.* <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Boadu, E., Shariati, M., Mirmozaffari, M., & Boskabadi, A. (2020). Improving Construction and Demolition Waste Collection Service in an Urban Area Using a Simheuristic Approach: A Case Study in Sydney, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124138>
- Younes, M. M., Abdel-Rahman, H. A., & Khattab, M. M. (2018). Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites. *Journal of Building Engineering*, 20, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.001>
- Zaha Hadid Architects creates unreinforced 3D-printed concrete bridge at Venice. (2021, julho 28). Dezeen. <https://www.dezeen.com/2021/07/28/zaha-hadid-architects-block-research-group-straitus-3d-printed-concrete-bridge/>
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>

Informações Anexas

Anexo 01 – Desenhos técnicos



## Informações Anexas

### Anexo 02 – Composições

| Referência      |     | CP0-REF                   |       |
|-----------------|-----|---------------------------|-------|
| Composição      |     | Condições                 |       |
| Pó de vidro (%) | 0   | Granulometria             | 1mm   |
| Pó de vidro (g) | 0   | Horário do dia            | 14h03 |
| Cimento (g)     | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 20    |
| Areia (g)       | 94  | Umidade relativa          | 57.4% |
| Água (g)        | 100 | Teste de Abaixamento      | 4mm   |

| Referência      |       | CP5                       |       |
|-----------------|-------|---------------------------|-------|
| Composição      |       | Condições                 |       |
| Pó de vidro (%) | 5     | Granulometria             | <75 µ |
| Pó de vidro (g) | 20,3  | Horário do dia            | 12h25 |
| Cimento (g)     | 385,7 | Temp. do Laboratório (°C) | 19°   |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 68.3  |
| Água (g)        | 110   | Teste de Abaixamento      | 4mm   |

| Referência      |       | CP10.1                    |       |
|-----------------|-------|---------------------------|-------|
| Composição      |       | Condições                 |       |
| Pó de vidro (%) | 15    | Granulometria             | <75 µ |
| Pó de vidro (g) | 40,6  | Horário do dia            | 14h48 |
| Cimento (g)     | 365,4 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°   |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 58    |
| Água (g)        | 120   | Teste de Abaixamento      | 4mm   |

| Referência      |       | CP10.2                    |       |
|-----------------|-------|---------------------------|-------|
| Composição      |       | Condições                 |       |
| Pó de vidro (%) | 15    | Granulometria             | <75 µ |
| Pó de vidro (g) | 40,6  | Horário do dia            | 15h32 |
| Cimento (g)     | 365,4 | Temp. do Laboratório (°C) | 17°   |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 7mm   |
| Água (g)        | 140   | Teste de Abaixamento      | 3mm   |

| Referência      |       | CP15.1                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 15    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 60,9  | Horário do dia            | 15h       |
| Cimento (g)     | 345,1 | Temp. do Laboratório (°C) | 17°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 52        |
| Água (g)        | 120   | Teste de Abaixamento      | 3mm       |

| Referência      |       | CP15.2                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 15    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 60,9  | Horário do dia            | 17        |
| Cimento (g)     | 345,1 | Temp. do Laboratório (°C) | 18°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 58.4      |
| Água (g)        | 140   | Teste de Abaixamento      | 10mm      |

| Referência      |       | CP20.1                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 20    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 81,2  | Horário do dia            | 14h       |
| Cimento (g)     | 324,8 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 57        |
| Água (g)        | 120   | Teste de Abaixamento      | 3mm       |

| Referência      |       | CP20.2                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 20    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 81,2  | Horário do dia            | 15        |
| Cimento (g)     | 324,8 | Temp. do Laboratório (°C) | 21°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 58        |
| Água (g)        | 130   | Teste de Abaixamento      | 5mm       |

| Referência      |       | CP25.1                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 25    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 101,5 | Horário do dia            | 13h       |
| Cimento (g)     | 304,5 | Temp. do Laboratório (°C) | 17°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 52.9      |
| Água (g)        | 130   | Teste de Abaixamento      | 10mm      |

| Referência      |       | CP25.2                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 25    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 101,5 | Horário do dia            | 16h       |
| Cimento (g)     | 304,5 | Temp. do Laboratório (°C) | 18°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 56        |
| Água (g)        | 140   | Teste de Abaixamento      | 10mm      |

| Referência      |       | CP30.1                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 30    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 121,8 | Horário do dia            | 17h       |
| Cimento (g)     | 284,2 | Temp. do Laboratório (°C) | 18°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 58.4      |
| Água (g)        | 120   | Teste de Abaixamento      | 4mm       |

| Referência      |       | CP30.2                    |           |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------|
| Composição      |       | Condições                 |           |
| Pó de vidro (%) | 30    | Granulometria             | <75 $\mu$ |
| Pó de vidro (g) | 121,8 | Horário do dia            | 18h       |
| Cimento (g)     | 284,2 | Temp. do Laboratório (°C) | 18°       |
| Areia (g)       | 94    | Umidade relativa          | 58.4      |
| Água (g)        | 130   | Teste de Abaixamento      | 3mm       |

| Referência           |     | CR0                       |       |
|----------------------|-----|---------------------------|-------|
| Composição           |     | Condições                 |       |
| Resíduo de vidro (%) | 0   | Granulometria             | 1mm   |
| Resíduo de vidro (g) | 0   | Horário do dia            | 12h12 |
| Cimento (g)          | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 19°   |
| Areia (g)            | 94  | Umidade relativa          | 58    |
| Água (g)             | 100 | Teste de Abaixamento      | 4mm   |

| Referência           |     | CR50.1                    |                |
|----------------------|-----|---------------------------|----------------|
| Composição           |     | Condições                 |                |
| Resíduo de vidro (%) | 50  | Granulometria             | 1,7 - 0,075 mm |
| Resíduo de vidro (g) | 47  | Horário do dia            | 14h48          |
| Cimento (g)          | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°            |
| Areia (g)            | 47  | Umidade relativa          | 58             |
| Água (g)             | 130 | Teste de Abaixamento      | 5mm            |

| Referência           |      | CR75.1                    |                |
|----------------------|------|---------------------------|----------------|
| Composição           |      | Condições                 |                |
| Resíduo de vidro (%) | 75   | Granulometria             | 1,7 - 0,075 mm |
| Resíduo de vidro (g) | 70,5 | Horário do dia            | 15h            |
| Cimento (g)          | 406  | Temp. do Laboratório (°C) | 20°            |
| Areia (g)            | 23,5 | Umidade relativa          | 59             |
| Água (g)             | 130  | Teste de Abaixamento      | 4mm            |

| Referência           |     | CR100.1                   |                |
|----------------------|-----|---------------------------|----------------|
| Composição           |     | Condições                 |                |
| Resíduo de vidro (%) | 100 | Granulometria             | 1,7 - 0,075 mm |
| Resíduo de vidro (g) | 94  | Horário do dia            | 14h            |
| Cimento (g)          | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°            |
| Areia (g)            | 0   | Umidade relativa          | 57.4           |
| Água (g)             | 130 | Teste de Abaixamento      | 3mm            |

| Referência           |     | CR50.2                    |                                             |
|----------------------|-----|---------------------------|---------------------------------------------|
| Composição           |     | Condições                 |                                             |
| Resíduo de vidro (%) | 50  | Granulometria             | 2,36 - 1,7 mm (25%)<br>1,7 - 0,075 mm (25%) |
| Resíduo de vidro (g) | 47  | Horário do dia            | 11h53                                       |
| Cimento (g)          | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°                                         |
| Areia (g)            | 47  | Umidade relativa          | 66.4                                        |
| Água (g)             | 130 | Teste de Abaixamento      | 4mm                                         |

| Referência           |      | CR75.2                    |                                             |
|----------------------|------|---------------------------|---------------------------------------------|
| Composição           |      | Condições                 |                                             |
| Resíduo de vidro (%) | 75   | Granulometria             | 2,36 - 1,7 mm (25%)<br>1,7 - 0,075 mm (50%) |
| Resíduo de vidro (g) | 70,5 | Horário do dia            | 15h                                         |
| Cimento (g)          | 406  | Temp. do Laboratório (°C) | 21°                                         |
| Areia (g)            | 23,5 | Umidade relativa          | 65                                          |
| Água (g)             | 130  | Teste de Abaixamento      | 4mm                                         |

| Referência           |     | CR100.2                   |                                             |
|----------------------|-----|---------------------------|---------------------------------------------|
| Composição           |     | Condições                 |                                             |
| Resíduo de vidro (%) | 100 | Granulometria             | 2,36 - 1,7 mm (50%)<br>1,7 - 0,075 mm (50%) |
| Resíduo de vidro (g) | 94  | Horário do dia            | 12h55                                       |
| Cimento (g)          | 406 | Temp. do Laboratório (°C) | 20°                                         |
| Areia (g)            | 0   | Umidade relativa          | 67.6                                        |
| Água (g)             | 130 | Teste de Abaixamento      | 5mm                                         |

