

# **OTIMIZAÇÃO DE ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO E CAL PARA IMPRESSÃO 3D A APLICAR NO PATRIMÓNIO**

**RICARDO MANUEL GARCEZ DIAS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professora Doutora Ana Sofia Guimarães, FEUP

---

Coorientador: Engenheiro Manuel Dias de Jesus, FEUP

JUNHO DE 2025

## **MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ [m.ec@fe.up.pt](mailto:m.ec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*Aos meus Pais e à minha Avó*

*"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende." – Leonardo da Vinci*



## **AGRADECIMENTOS**

Chegar ao fim deste percurso académico foi uma jornada repleta de altos e baixos, de vários desafios, mas sobretudo de aprendizagem e de crescimento pessoal. Nenhuma conquista acontece de forma isolada, portanto gostaria de agradecer às pessoas que tornaram possível este fim de ciclo.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, pela paciência, compressão, encorajamento e pelo suporte que me deram ao longo desta longa caminhada. Nos momentos mais difíceis estiveram sempre disponíveis e deram-me força, confiança e apoio para continuar, que foram bastante importantes para ultrapassar os obstáculos que foram surgindo.

Um agradecimento muito especial à minha avó, Maria Alice Ferreira Couto, que infelizmente não teve a oportunidade de me ver terminar este bonito ciclo de estudos, mas que esteve presente em grande parte do percurso escolar. Os seus ensinamentos e conselhos foram muito importantes tanto a nível académico como pessoal. Sei que onde estiver vai continuar a torcer por mim e a sentir orgulho.

Quero também expressar a minha sincera gratidão à Professora Doutora Ana Sofia Guimarães e ao Engenheiro Manuel Jesus, pela orientação, dedicação e disponibilidade demonstradas ao longo de todo o processo de elaboração desta dissertação. A vossa experiência, sugestões construtivas e acompanhamento constante foram fundamentais para a concretização deste trabalho e para o meu crescimento académico e pessoal.

Gostaria de agradecer também à Engenheira Patrícia Pereira do Laboratório de Física e Tecnologias das Construções (LFTC) pela realização dos ensaios de flexão e compressão bem como pela disponibilidade demonstrada ao longo do processo. Agradeço igualmente ao Engenheiro Eduardo Costa do Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC), pela ajuda e acompanhamento na realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade. A colaboração de ambos foi fundamental para o bom desenvolvimento da componente experimental deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores, colegas e demais pessoas que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento e para que eu chegasse até aqui. De ressaltar as partilhas e os momentos vividos ao longo desta bonita etapa.



## **RESUMO**

A impressão 3D (I3D) têm-se destacado como uma tecnologia inovadora e com uma grande potencialidade para o setor da construção civil, e pode ter aplicações tanto em construção nova como na reabilitação de edifícios, nomeadamente em edifícios históricos. Esta tecnologia permite transformar os processos tradicionais, trazendo ganhos em termos de eficiência, personalização e sustentabilidade. A possibilidade de produzir replicas, elementos decorativos e peças únicas com elevada precisão e qualidade representa uma solução eficaz para intervenções de conservação e restauro sabendo das diferenças das técnicas, tecnologias e dos materiais que foram usados na construção desses edifícios históricos para os que se usam atualmente.

A I3D permite otimizar os trabalhos de construção tornando o setor mais automático e eficiente, reduzindo os custos, o tempo de execução e também os desperdícios permitindo uma mudança significativa no setor [1], que é um dos mais poluentes, na emissão de gases com efeito de estufa como o dióxido de carbono. Com a chegada da indústria 4.0 a I3D tem um papel preponderante na transformação digital da construção civil.

A reabilitação de edifícios históricos é fundamental para preservar o seu valor, arquitetónico, estrutural, cultural e histórico, enquanto promovem a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de novas construções trazendo também benefícios, económicos e culturais. Nos últimos anos novas técnicas têm sido exploradas para aprimorar a reabilitação nomeadamente sistemas de impressão e argamassas. Embora a I3D ainda esteja no início do seu desenvolvimento já surge como uma alternativa para a reprodução de elementos arquitetónicos complexos.

No âmbito da reabilitação patrimonial, uma das principais preocupações incide sobre o desenvolvimento de argamassas compatíveis com este tipo de edifícios históricos, havendo necessidade de garantir que os materiais utilizados respeitam as características originais da construção e contribuem para a sua preservação [2], [3]. No caso em estudo, as mísulas do Teatro Nacional São João (TNSJ) foram desenvolvidas com argamassas à base de cal e cimento, sendo adaptadas para aplicação em impressão 3D. Esta abordagem permite tornar o processo construtivo mais sustentável e eficiente, mantendo simultaneamente as propriedades estruturais e físicas necessárias, como uma boa trabalhabilidade e um acabamento adequado.

Com esta dissertação pretendesse explorar o desenvolvimento de novas soluções de argamassa da maneira mais otimizada, analisando as suas propriedades físicas e mecânicas para usar em I3D com base em ensaios de laboratório, de modo a serem compatíveis com o património edificado, além disso serão descritos os diferentes processos de laboratório de modo a obter os melhores resultados. Com esta investigação busco contribuir para o avanço do conhecimento nesta área emergente promovendo soluções que conciliem eficiência, sustentabilidade e respeito pelo património arquitetónico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D, Reabilitação de edifícios, Argamassas, Sustentabilidade, Propriedades mecânicas.



## **ABSTRACT**

3D printing (3DP) has emerged as an innovative technology with significant potential for the construction industry, with applications in both new construction and building rehabilitation, particularly in historical structures. This technology has the capacity to transform traditional construction methods, offering gains in efficiency, customization, and sustainability. The ability to produce replicas, decorative elements, and unique components with high precision and quality makes 3DP an effective solution for conservation and restoration work – especially considering the differences between historical techniques, materials, and technologies used today.

3DP enhances construction workflows by making the sector more automated and efficient, reducing costs, execution time, and material waste [1]. It also contributes to a significant shift in one of the most polluting industries in terms of greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide. With the advent of Industry 4.0, 3DP plays a key role in the digital transformation of construction.

The rehabilitation of historical buildings is essential to preserve their architectural, structural, cultural, and historical value, while also promoting sustainability by reducing the need for new construction. This brings both economic and cultural benefits. In recent years, new techniques have been explored to improve rehabilitation processes – particularly 3DP systems and compatible mortars. Although 3DP is still in the early stages of development, it already presents itself as a viable method for reproducing complex architectural elements.

In the context of heritage rehabilitation, one of the main concerns is the development of mortars compatible with historical structures. It is crucial to ensure that the materials used respect the original characteristics of the building and contribute to its preservation [2], [3]. In the case study presented here, the corbels (mísulas) of the São João National Theatre (TNSJ) were originally developed using lime- and cement-based mortars and have now been adapted for 3DP. This approach enables a more sustainable and efficient construction process while maintaining the necessary structural and physical properties, such as good workability and a suitable finish.

This thesis aims to explore the development of optimized mortar solutions by analyzing their physical and mechanical properties for use in 3DP, based on laboratory testing, with the goal of ensuring compatibility with heritage buildings. In addition, the various laboratory procedures used to achieve the best results will be described. Through this research, the aim is to contribute to the advancement of knowledge in this emerging field by promoting solutions that combine efficiency, sustainability, and respect for architectural heritage.

**KEYWORDS:** 3D Printing, Building Rehabilitation, Mortars, Sustainability, Mechanical Properties.



## ÍNDICE GERAL

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                     | V    |
| <b>RESUMO</b> .....                             | VII  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                           | IX   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                  | XV   |
| <b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....                  | XVII |
| <b>SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</b> ..... | XIX  |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....          | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO .....            | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....    | 1 |
| 1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 2 |
| 1.3. METODOLOGIA .....              | 2 |
| 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO ..... | 3 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....                    | 5  |
| 2.1. ENQUADRAMENTO .....                                 | 5  |
| 2.2. REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO .....          | 6  |
| 2.2.1. CONCEITOS .....                                   | 6  |
| 2.3. IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO .....                    | 8  |
| 2.3.1. ENQUADRAMENTO .....                               | 8  |
| 2.3.2. PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D PARA A CONSTRUÇÃO ..... | 9  |
| 2.3.3. NORMAS PARA IMPRESSÃO 3D .....                    | 10 |
| 2.3.4. TECNOLOGIAS PIONEIRAS .....                       | 11 |
| 2.3.4.1. Concrete Printing .....                         | 11 |
| 2.3.4.2. Countor Crafting .....                          | 11 |
| 2.3.4.3. D-Shape .....                                   | 12 |
| 2.3.5. SISTEMAS DE IMPRESSÃO .....                       | 12 |
| 2.3.5.1. Sistema de Pórtico (Gantry) .....               | 12 |
| 2.3.5.2. Braço Robótico .....                            | 13 |
| 2.3.5.3. Sistema Delta .....                             | 14 |
| 2.3.5.4. Outros processos .....                          | 14 |
| 2.3.6. EXEMPLOS DE IMPRESSÃO 3D NA REABILITAÇÃO .....    | 15 |
| 2.4. ARGAMASSAS E PROPRIEDADES .....                     | 18 |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1. ARGAMASSAS USADAS NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL ..... | 18        |
| 2.4.2. ARGAMASSAS À BASE DE CAL .....                    | 18        |
| 2.4.3. ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D .....                | 19        |
| 2.4.4. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....               | 22        |
| 2.4.5. PROPRIEDADES REOLÓGICAS .....                     | 24        |
| 2.4.6. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO [114] .....     | 25        |
| 2.4.7. ENSAIOS E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS .....       | 25        |
| <b>2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>                    | <b>27</b> |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. CASO DE ESTUDO .....</b>                                        | <b>29</b> |
| <b>3.1. ENQUADRAMENTO .....</b>                                       | <b>29</b> |
| <b>3.2. HISTÓRIA E REABILITAÇÃO DO TEATRO NACIONAL SÃO JOÃO .....</b> | <b>29</b> |
| <b>3.3. MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>                                | <b>32</b> |
| 3.3.1. EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO 3D E SISTEMA DE EXTRUSÃO .....        | 32        |
| 3.3.2. ARGAMASSAS .....                                               | 33        |
| 3.3.3. OUTROS EQUIPAMENTOS .....                                      | 34        |
| <b>3.4. PROCESSO DE MISTURA .....</b>                                 | <b>34</b> |
| <b>3.5. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....</b>                            | <b>35</b> |
| 3.5.1. ENSAIO DE ABAIXAMENTO .....                                    | 36        |
| 3.5.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO .....                                   | 36        |
| <b>3.6. TESTES DE IMPRESSÃO .....</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>3.7. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>                        | <b>38</b> |
| 3.7.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO .....                                     | 38        |
| 3.7.2. ENSAIO DE FLEXÃO .....                                         | 39        |
| 3.7.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....              | 40        |
| <b>3.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>                                 | <b>40</b> |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b> | <b>43</b> |
| <b>4.1. ENQUADRAMENTO .....</b>                   | <b>43</b> |
| <b>4.2. TESTES DE IMPRESSÃO .....</b>             | <b>43</b> |
| <b>4.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....</b>        | <b>54</b> |
| <b>4.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>    | <b>56</b> |
| 4.4.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES .....              | 56        |
| 4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....   | 57        |
| 4.4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....       | 59        |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE ..... | 61        |
| 4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....                           | 65        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                               | <b>69</b> |
| 5.1. CONCLUSÕES GERAIS .....                             | 69        |
| 5.2. CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO .....                       | 70        |
| 5.3. LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                | 70        |
| 5.4. PUBLICAÇÕES .....                                   | 71        |
| <br>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                     | <br>73    |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Flowchart das etapas a seguir durante a dissertação. ....                                                                                                                                                         | 3  |
| Figura 2 – Caso de estudo da aplicação do scanner a laser na reabilitação [14]. ....                                                                                                                                         | 8  |
| Figura 3 – Etapas de impressão 3D, adaptado de Gao et al. [28]. ....                                                                                                                                                         | 9  |
| Figura 4 – a) Peça impressa através de Concrete Printing [35] e b) Impressora 3D Concrete Printing [36]. ....                                                                                                                | 11 |
| Figura 5 – Impressora 3D - Contour Crafting [36]. ....                                                                                                                                                                       | 12 |
| Figura 6 – a) Peça impressa em D-Shape [38] e b) Impressora 3D D-Shape [36]. ....                                                                                                                                            | 12 |
| Figura 7 – Sistema de pórtico [42]. ....                                                                                                                                                                                     | 13 |
| Figura 8 – a) Sistema Crane WASP; b) Projeto TECLA [43]. ....                                                                                                                                                                | 13 |
| Figura 9 – a) Braço robótico CyBe [45] e b) Casa Semilla [44]. ....                                                                                                                                                          | 14 |
| Figura 10 – Impressora Delta WASP 3MT [46]. ....                                                                                                                                                                             | 14 |
| Figura 11 – a) Minibuilders [47] e b) Sistema de impressão 3D Apis Cor [49]. ....                                                                                                                                            | 15 |
| Figura 12 – a) Base sem degradação; b) Base semi degradada; c) Base muito degradada [52]. ....                                                                                                                               | 16 |
| Figura 13 – Base impressa [52]. ....                                                                                                                                                                                         | 16 |
| Figura 14 – a) Modelo 3D do ornamento [53] e b) Impressão 3D [53]. ....                                                                                                                                                      | 17 |
| Figura 15 – a) Le stryge e b) Bloco de canto impresso. ....                                                                                                                                                                  | 17 |
| Figura 16 – Ornamentos [58]. ....                                                                                                                                                                                            | 18 |
| Figura 17 – Composição média de argamassa: (a) argamassa à base de cimento, (b) argamassa com filer calcário, (c) argamassa com cinzas volantes e filer calcário e (d) argamassa com metacaulino e filer calcário [92]. .... | 21 |
| Figura 18 – Argamassa da CyBe. ....                                                                                                                                                                                          | 21 |
| Figura 19 – a) Casa "Gaia" [105] e b) Impressora Crane WASP [105]. ....                                                                                                                                                      | 22 |
| Figura 20 – Ensaio da mesa de espalhamento [110]. ....                                                                                                                                                                       | 24 |
| Figura 21 – Exemplo de printabilidade. ....                                                                                                                                                                                  | 24 |
| Figura 22 – Plano experimental. ....                                                                                                                                                                                         | 29 |
| Figura 23 – a) Fachada Teatro Nacional São João [120] e b) Mísula original do TNSJ [120]. ....                                                                                                                               | 30 |
| Figura 24 – a) Parte inferior [120] e b) Gaveta da mísula [120]. ....                                                                                                                                                        | 30 |
| Figura 25 – Mísula fingida degradada [120]. ....                                                                                                                                                                             | 31 |
| Figura 26 – a) Impressora Delta WASP 40100 [124] e b) Extrusor utilizado [124]. ....                                                                                                                                         | 32 |
| Figura 27 – a) CEM I 52,5N (Br) e b) Cal Hidráulica HL5. ....                                                                                                                                                                | 33 |
| Figura 28 – Misturadora. ....                                                                                                                                                                                                | 34 |
| Figura 29 – a) Pesagem dos componentes e b) Mistura da argamassa. ....                                                                                                                                                       | 35 |

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30 – a) Cone e b) Medição do abaixamento. ....                                                                                                                                                                                              | 36 |
| Figura 31 – Ensaio de espalhamento. ....                                                                                                                                                                                                           | 37 |
| Figura 32 – Composições com 70% de ligante e 30% agregado. ....                                                                                                                                                                                    | 44 |
| Figura 33 – Peças impressas com 70% de ligante e 30% de agregado. ....                                                                                                                                                                             | 45 |
| Figura 34 – Composições com 60% de ligante e 40% agregado. ....                                                                                                                                                                                    | 47 |
| Figura 35 – Peças impressas com 60% de ligante e 40% de agregado. ....                                                                                                                                                                             | 48 |
| Figura 36 – Peças impressas com SP. ....                                                                                                                                                                                                           | 51 |
| Figura 37 – Composição média de argamassa: a) argamassa com 70% ligante + 30% agregados, b) argamassa com 60% ligante + 40% agregados, c) argamassa com 70% ligante + 30% agregados e SP e d) argamassa com 60% ligante + 40% agregados e SP. .... | 54 |
| Figura 38 – a) Gráfico da relação entre abaixamento e a/l; b) Gráfico da relação espalhamento e a/l. ....                                                                                                                                          | 56 |
| Figura 39 – a) Moldagem dos provetes e b) Provetes finais. ....                                                                                                                                                                                    | 57 |
| Figura 40 – a) Provete ensaiado à compressão e b) Esquema representativo do ensaio à compressão. ....                                                                                                                                              | 57 |
| Figura 41 – Comparação dos valores do ensaio de resistência à compressão com e sem SP. ....                                                                                                                                                        | 58 |
| Figura 42 – a) Provete ensaiado à flexão e b) Esquema representativo do ensaio à flexão. ....                                                                                                                                                      | 59 |
| Figura 43 – Comparação dos valores do ensaio de resistência à flexão com e sem SP. ....                                                                                                                                                            | 60 |
| Figura 44 – a) Impermeabilização dos provetes; b) Ensaio de absorção de água por capilaridade; c) Icosit K-101N A; d) Icosit K-101N B. ....                                                                                                        | 62 |
| Figura 45 – Curvas de absorção das argamassas sem SP. ....                                                                                                                                                                                         | 64 |
| Figura 46 – Curvas de absorção das argamassas com SP. ....                                                                                                                                                                                         | 65 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Palavras-chave usadas na pesquisa. ....                                                | 5  |
| Tabela 3 – Processos de impressão. ....                                                           | 10 |
| Tabela 4 – Síntese das diferenças entre argamassas tradicionais e modernas. ....                  | 19 |
| Tabela 5 – Composição típica das argamassas. ....                                                 | 20 |
| Tabela 6 – Materiais alternativos. Adaptado de Perrot et al. [107]. ....                          | 22 |
| Tabela 7 – Ensaio para argamassas. ....                                                           | 26 |
| Tabela 2 – Estudo de argamassas TNSJ. ....                                                        | 31 |
| Tabela 8 – Características da impressora Delta WASP 40100 [125]. ....                             | 32 |
| Tabela 9 – Parâmetros de impressão para a Delta WASP 40100. ....                                  | 33 |
| Tabela 10 – Formulações de argamassa testadas. ....                                               | 34 |
| Tabela 11 – Critérios de avaliação da argamassa. ....                                             | 36 |
| Tabela 12 – Avaliação das peças impressas. ....                                                   | 38 |
| Tabela 13 – Composição das argamassas com 70% ligante + 30% agregados. ....                       | 44 |
| Tabela 14 – Avaliação das peças impressas com 70% de ligante e 30% de agregado. ....              | 46 |
| Tabela 15 – Composição das argamassas 60% de ligante e 40% de agregado. ....                      | 46 |
| Tabela 16 – Avaliação das peças impressas – 60% ligante e 40% agregado. ....                      | 49 |
| Tabela 17 – Composição das argamassas com SP. ....                                                | 50 |
| Tabela 18 – Avaliação das peças impressas com SP. ....                                            | 53 |
| Tabela 19 – Resultados dos ensaios no estado fresco: espalhamento e abaixamento. ....             | 55 |
| Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compressão. ....                                            | 58 |
| Tabela 21 – Resultados dos ensaios à flexão. ....                                                 | 60 |
| Tabela 22 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas sem SP. .... | 62 |
| Tabela 23 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas com SP. .... | 63 |
| Tabela 24 – Comparação do $A_w$ com e sem SP. ....                                                | 64 |
| Tabela 25 – Resumos dos resultados das argamassas com melhor desempenho. ....                     | 67 |
| Tabela 26 – Síntese dos valores dos ensaios. ....                                                 | 67 |



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

3D – Tridimensional

3DP – 3D Printing

AEC – Arquitetura e Engenharia Civil

AM – Additive Manufacturing

BIM – Building Information Modelling

CAD – Computer Aided Design

FDM – Fusion Deposition Modelling

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia

IPPAR – Instituto Português do Património e Arquitetónico e Arqueológico

ISO/ASTM - International Organization Standardization/American Society for Testing and Materials

I3D – Impressão 3D

MA – Manufatura Aditiva

RERU – Regime Excecional de Reabilitação Urbana

RGEU – Regulamento Geral das Edificações Urbanas

Ref – Referência

SLA – Stereolithography

SLS – Selective Laser Sintering

SP – Superplastificante

STL – Standard Tessellation Language

TNSJ – Teatro Nacional São João

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

WASP – World's Advanced Saving Program



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A presente dissertação insere-se no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, com especialização em Construções, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

O setor da construção enfrenta atualmente desafios significativos, nomeadamente a necessidade de adotar soluções mais eficientes e sustentáveis. Trata-se de um dos setores que mais recursos naturais consome e que mais contribui para as emissões de dióxido de carbono, gerando impactos ambientais significativos. Paralelamente, a baixa eficiência associada aos métodos tradicionais de construção justifica uma aposta crescente na automação de tarefas, tanto em obra como em ambiente fabril.

Neste contexto, a I3D aplicada à construção tem vindo a afirmar-se como uma tecnologia promissora. Entre as suas vantagens destacam-se o aumento da eficiência, a redução de custos e desperdícios, bem como a liberdade formal na criação de geometrias complexas. No entanto, esta tecnologia encontra-se ainda em fase de desenvolvimento, com a maioria das aplicações limitadas a edifícios experimentais, elementos de fachada e pequenos protótipos.

A reabilitação de edifícios históricos constitui uma área particularmente exigente, dado o seu elevado valor patrimonial, arquitetónico e cultural. Estas intervenções requerem soluções que respeitem os materiais e técnicas construtivas originais, frequentemente diferentes das atualmente utilizadas e, em muitos casos, pouco documentadas. Neste cenário, a I3D surge como uma alternativa aos métodos tradicionais como a moldagem manual ou escultura, permitindo a reprodução rápida, precisa e não destrutiva de elementos arquitetónicos danificados.

Para viabilizar a aplicação da I3D neste domínio, é essencial o desenvolvimento de argamassas compatíveis, que apresentem propriedades mecânicas e físicas adequadas ao processo e ao contexto de aplicação. Assim, esta dissertação foca-se na otimização de argamassas à base de cal e cimento, com adição de areia e aditivos, procurando identificar a combinação que proporcione melhor desempenho na impressão. O objetivo final é contribuir para a aplicação desta tecnologia na reabilitação do património edificado, através da criação de soluções compatíveis ao nível dos materiais, tecnicamente viáveis e sustentáveis.

### 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de argamassas à base de cal e cimento para I3D para usar em réplicas de componentes com valor patrimonial. A investigação concentra-se na formulação e otimização das respetivas argamassas, determinando-se proporções ideais de cimento, cal, agregados e aditivos.

### 1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem atingidos são:

- Compreender as tecnologias e/ou processos associados à I3D para o setor da construção, com foco nas suas aplicações, vantagens e limitações no contexto da reabilitação de edifícios históricos;
- Investigar os tipos de materiais utilizados tanto na construção tradicional como na I3D, particularmente as argamassas, atendendo maioritariamente às suas propriedades físicas e mecânicas;
- Analisar os requisitos e os parâmetros específicos das argamassas para I3D, incluindo trabalhabilidade, extrudabilidade, capacidade de construção e resistência no estado endurecido;
- Avaliar a viabilidade e os desafios da aplicação da I3D no âmbito da reabilitação de edifícios históricos, identificando as oportunidades do seu uso para a preservação e reabilitação dos mesmos.

### 1.3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos específicos definidos anteriormente, definiu-se uma metodologia que contemplou cinco etapas principais:

1. **Revisão da literatura:** A primeira fase consistiu numa revisão teórica aprofundada sobre I3D no setor da construção, com ênfase na sua aplicação à reabilitação de edifícios com valor patrimonial. Foram também estudadas as características dos materiais e argamassas tradicionalmente utilizados neste tipo de construções. A revisão foi realizada através da análise de artigos científicos, livros, teses e outras fontes disponíveis em bases de dados académicas como a Elsevier e o Repositório Aberto da Universidade do Porto, recorrendo a palavras-chave específicas;
2. **Desenvolvimento experimental em laboratório:** Numa segunda fase foi apresentando o caso de estudo das mísulas do TNSJ, e também os materiais assim como os ensaios realizados. Foram desenvolvidas formulações de argamassas à base de cal e cimento, com incorporação de aditivos e areia, com o objetivo de otimizar as suas propriedades para aplicação em I3D. As proporções dos constituintes foram definidas com base em critérios de trabalhabilidade, extrudabilidade e resistência, tendo sido realizados testes preliminares de impressão para avaliar o comportamento das diferentes composições;
3. **Caracterização e análise dos resultados:** As argamassas selecionadas foram submetidas a ensaios laboratoriais normalizados para avaliação do seu desempenho mecânico e físico. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão e absorção de água por capilaridade, de acordo com as normas europeias em vigor. A análise dos resultados permitiu identificar as composições mais promissoras para aplicação prática;
4. **Síntese e conclusões:** Por fim, com base em toda a investigação desenvolvida, foram retiradas conclusões quanto à viabilidade técnica da utilização de argamassas otimizadas para I3D na reabilitação do património construído, tendo ainda sido identificadas limitações, desafios e recomendações para trabalhos futuros.

Na Figura 1 pode-se observar com melhor detalhe as tarefas a executar.

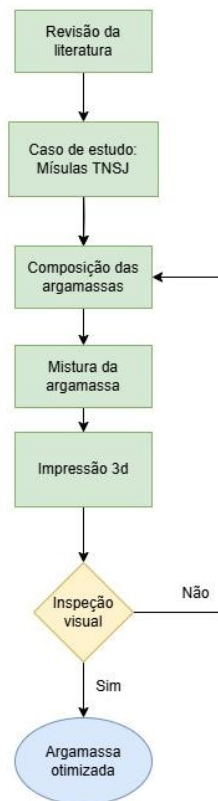


Figura 1 – Flowchart das etapas a seguir durante a dissertação.

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

- No capítulo um, *Introdução*, é feita uma introdução ao tema abordado, sendo também definidos os objetivos do estudo, as tarefas a serem realizadas e a metodologia adotada.
- No capítulo dois, *Revisão de Literatura*, é feito um levantamento bibliográfico sobre os temas principais relacionados com o trabalho, nomeadamente: conceitos; materiais usados para I3D; tecnologias/processos de impressão; argamassas e suas propriedades; aplicações da I3D na reabilitação.
- No capítulo três, *Caso de Estudo*, é apresentado o caso de estudo e são abordados os processos de otimização das argamassas para I3D, destacando os constituintes utilizados e as composições testadas. Adicionalmente, são apresentados os métodos da preparação das misturas, o processo de impressão, as características do modelo 3D utilizado e são descritos os ensaios realizados às argamassas no estado fresco (ensaio de espalhamento e abaixamento) e no estado endurecido (ensaio de compressão, flexão e absorção de água por capilaridade).
- No capítulo quatro, *Análise e Discussão de Resultados*, procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos ao longo do trabalho experimental efetuado. As diferentes composições desenvolvidas e o seu desempenho nos ensaios realizados são comparados entre si e com valores encontrados na literatura, identificando-se possíveis causas capazes de influenciar o comportamento das argamassas e possíveis melhorias, caso necessário.

- No capítulo cinco, *Conclusões*, são apresentadas as conclusões finais do trabalho desenvolvido, com base na análise dos resultados obtidos e na realização dos objetivos propostos e limitações/dificuldades encontradas. Por fim, são sugeridos trabalhos futuros capazes de dar continuidade a este trabalho.

## 2

## REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1. ENQUADRAMENTO

A revisão da literatura que se segue visa estabelecer as bases teóricas para compreensão dos conteúdos que vão ser desenvolvidos com este trabalho, abordando dois temas essenciais: a reabilitação do património e a I3D na construção civil. Estes temas estão interligados uma vez que a preservação do património edificado enfrenta vários desafios como a degradação das suas estruturas e elementos, a necessidade de compatibilização de materiais e a escassez de técnicas tradicionais eficientes e sustentáveis. Sendo a I3D uma tecnologia emergente, poderá contribuir significativamente para a resolução destes problemas.

A integração da I3D na reabilitação do património representa um avanço tecnológico significativo, conjugando inovação com princípios de conservação, enquanto as técnicas tradicionais exigem mão de obra especializada e enfrentam limitações em geometrias complexas, a I3D oferece potencial para personalização de formas, redução de desperdícios e compatibilidade com os materiais utilizados originalmente através de formulações otimizadas [4].

A pesquisa foi conduzida com recurso a bases de dados como Scopus, Web of Science, Elsevier e o repositório aberto da Universidade do Porto, garantindo a seleção de artigos relevantes publicados entre 2010 e 2025. Também foram consideradas normas internacionais e websites relevantes. As palavras-chave usadas na pesquisa estão organizadas na Tabela 1 e a pesquisa foi efetuada em inglês para atingir o maior número de publicações relevantes.

Tabela 1 – Palavras-chave usadas na pesquisa.

| <b>Categoria</b>              | <b>Palavras-Chave</b>                                                                                                      |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tecnologia</b>             | “3D Printing”<br>“Applications of 3DP in Construction”                                                                     |
| <b>Património</b>             | “Heritage Building”<br>“Restoration of historical Buildings”<br>“Teatro Nacional São João”<br>“Heritage Rehabilitation”    |
| <b>Materiais</b>              | “Mortars”<br>“Historic Buildings Mortars”<br>“Traditional Construction mortars”<br>“Lime Mortars”<br>“Lime-Cement mortars” |
| <b>Aplicações específicas</b> | “3D printing in building restoration”<br>“3D printing for cultural heritage preservation”                                  |

Os objetivos específicos desta revisão da literatura incluem a:

- Caracterização das propriedades fundamentais das argamassas para I3D.
- Análise de casos de estudo relevantes da aplicação da I3D em contexto patrimonial.
- Identificação e caracterização de argamassas tradicionais.

## 2.2. REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO

### 2.2.1. CONCEITOS

Nas próximas décadas teremos uma demanda crescente do número de edifícios a reabilitar e com uma grande necessidade de urgência daí ser extremamente importante atualmente conservar e preservar os edifícios assim como continuar o desenvolvimento de tecnologias eficientes. Segundo Kynbraten e Larsstuen et al. [5], estima-se que entre 70-80% dos edifícios que serão usados em 2050 já estão construídos. Para melhor compreender a reabilitação do património edificado, é necessário entender alguns conceitos associados, como os princípios de conservação e restauro, o significado de património cultural, os tipos de degradação que afetam os edifícios históricos e as abordagens possíveis para a sua preservação.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) (1972), o património cultural compreende *“monumentos, conjuntos arquitetónicos e sítios com valor histórico, artístico ou científico excepcional que constituem testemunhos únicos de civilizações ou tradições culturais”* [6].

Os edifícios e estruturas antigas carregam consigo a identidade de uma ou várias épocas com grande importância que com o passar dos anos se degradam devido a vários fatores como poluição, a presença de sais solúveis, bio deterioração e cargas mecânicas, contemplando diferentes materiais, técnicas construtivas e estilos arquitetónicos [7]. Assim, a reabilitação e a conservação tornam-se indispensáveis para assegurar a sua durabilidade e valorização. As suas estruturas incluem elementos arquitetónicos de grande complexidade como esculturas, molduras e fachadas [8], e as técnicas tradicionais de construção muitas das vezes não dão uma resposta eficaz a essa necessidade de renovação. A I3D pode ser usada na reabilitação para reproduzir estas peças com a precisão necessária [7], utilizando materiais compatíveis com os utilizados originalmente. Contudo, existem alguns desafios acrescidos: na maioria das construções faltam documentos e informação sobre os materiais e técnicas utilizados originalmente, assim como a maioria dos edifícios são constituídos por pedra e alvenaria com formas complexas [9], tornando difícil os trabalhos manuais.

A preservação do património arquitetónico não se limita apenas à manutenção física das estruturas, mas também à salvaguarda da memória histórica e cultural que elas apresentam e para garantir que as intervenções de conservação do património sejam eficazes e que respeitam a autenticidade dos edifícios, estas envolvem diferentes níveis e que variam consoante o estado, as causas das patologias e as condições futuras da estrutura a reabilitar. Segundo Feilden et al. são [3]:

1. Prevenção da deterioração: Medidas de modo a evitar a deterioração, como manutenção regular.
2. Preservação: Manutenção do estado atual, sem alterações significativas.
3. Consolidação: Reforço e estabilização das partes danificadas para evitar mais degradação.
4. Restauração: Reparação das partes danificadas.
5. Reabilitação: Adaptação do edifício para novos usos.

6. Reprodução: Criação de cópias de elementos danificados ou que se perderam ao longo do tempo.
7. Reconstrução: Reconstrução de partes ou de todo o edifício que foi danificado.

Para que uma intervenção seja bem-sucedida, do ponto de vista cultural e técnico, ela deve ser realizada com base em princípios sólidos. A carta de Veneza (1964) propõe os seguintes princípios [2]:

- Segurança estrutural;
- Respeito pelo valor cultural;
- Intervenção mínima;
- Reversibilidade das ações;
- Integração no conjunto do edifício;
- Compatibilidade de materiais;
- Custos controlados.

Em Portugal, a reabilitação do património é regulada por um sistema dual, que divide competências entre as autoridades nacionais e municipais. No plano estratégico nacional, esta assenta em três pilares fundamentais: o Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) que define os parâmetros técnicos essenciais para todas as construções urbanas; a legislação patrimonial, que protege os bens culturais classificados; o Regime Excecional de Reabilitação Urbana (RERU), que introduz flexibilidade em operações de requalificação. A nível local, os municípios operam através dos seus planos diretores que delimitam zonas de proteção patrimonial, estabelecem condicionantes urbanísticas e identificam imóveis com valor cultural [10].

O restauro de peças únicas e históricas com geometrias complexas envolve uma série de cuidados e desafios, sendo fundamental haver um equilíbrio entre métodos tradicionais e tecnologias modernas.

Tradicionalmente, o restauro era realizado por artesãos especializados que recorriam a técnicas manuais, como esculpir, moldar e aplicar argamassas de materiais que eram comuns nas épocas de construção desses edifícios, baseando-se na observação direta e no conhecimento empírico transmitido ao longo de gerações. Estes métodos permitem respeitar os materiais originais e as características construtivas, mas exigem mão de obra de qualidade, mais tempo de execução e maiores custos [11].

Com o avanço da tecnologia, tornou-se possível integrar métodos digitais aos processos de restauro, nomeadamente através da digitalização 3D da peça, que é uma tecnologia sem contacto e não destrutiva [7], criando um modelo com vários pontos que representam o artefacto num modelo digital, comparado com as técnicas tradicionais como o desenho, permite uma redução dos custos e um aumento da informação obtida [12].

Atualmente, existem diferentes técnicas de digitalização aplicadas a reabilitação, sendo as mais utilizadas a fotogrametria digital e o scanner a laser. A fotogrametria consiste na captação de várias imagens do objeto a partir de diferentes ângulos, utilizando software próprio para reconstruir o modelo 3D baseado na sobreposição dessas imagens e na triangulação de pontos. Tem sido amplamente usado, uma vez que permite um levantamento detalhado das geometrias e texturas sem a necessidade de contacto com o material original [13]. O scanner a laser utiliza um feixe de luz para medir a distância entre o sensor e a superfície do objeto, gerando uma nuvem de pontos depois transformada num modelo 3D [13]. Na Figura 2 podemos ver um exemplo da aplicação do scanner a laser para produzir um modelo de um castelo.



Figura 2 – Caso de estudo da aplicação do scanner a laser na reabilitação [14].

As argamassas amplamente utilizadas na construção civil e em intervenções de restauro acabam por sofrer de degradação com o passar do tempo. Estes fenómenos são desencadeados por diversos fatores que, segundo Veiga et al., incluem a ação de agentes atmosféricos, variações de temperatura, ciclos de humedecimento, secagem e falta de intervenções de conservação e manutenção [15]. Entre as patologias mais comuns, destacam-se:

- Fissuras – Podem surgir devido a movimentações estruturais, retração durante o endurecimento ou sobrecarga por cargas mecânicas. Quando não reparadas, facilitam a infiltração de água, acelerando outros processos de degradação [15], como perda de adesão e de resistência mecânica [16], [17].
- Florescências – Caracterizadas pelo aparecimento de depósitos esbranquiçados na superfície, são causadas pela migração e cristalização de sais solúveis presentes nos materiais ou provenientes do solo. Esses sais podem provocar a desagregação da argamassa, reduzindo a sua resistência [18].
- Erosão – Resulta da ação abrasiva do vento, da chuva ou de ciclos de gelo-degelo, especialmente em regiões com climas mais severos. Com o tempo, a superfície perde massa, expondo os agregados e reduzindo a proteção do suporte.
- Descolamentos e falhas de adesão – Ocorrem quando há perda de ligação entre a argamassa e o substrato, geralmente devido à humidade, à aplicação inadequada ou à incompatibilidade entre materiais. Em casos graves, podem levar ao desprendimento de revestimentos [19].

Para garantir a preservação do património, é essencial compreender as causas dessas patologias e desenvolver soluções de reparação compatíveis com os materiais originais. Segundo Maurenbrecheer et al., técnicas como análises químicas, ensaios não destrutivos e a utilização de argamassas com composição semelhante à original são fundamentais para intervenções eficazes e duradouras [20]. Além disso, a adoção de medidas preventivas, como a aplicação de hidrofugantes ou a execução de drenagens adequadas, pode reduzir a ação da humidade, um dos principais agentes de degradação [21].

## 2.3. IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

### 2.3.1. ENQUADRAMENTO

A I3D, também conhecida como manufatura aditiva (MA), começou a ser estudada e desenvolvida na década de 1980. É uma tecnologia que permite o fabrico de peças a partir de um modelo 3D, o Computer Aided Design (CAD) [22] e que tem a particularidade de não necessitar de qualquer tipo de sistema de cofragem no setor da Construção. Estudos mostram que esta tecnologia é capaz de reduzir o custo de construção em 35%-60%, o custo de mão-de-obra em 50%-80% e o tempo de produção em 50%-70%

[1]. Permite ainda a impressão tanto em estaleiro como em fábrica, sendo depois as peças assembladas em obra.

A I3D está atualmente integrada em diversas indústrias como a aeroespacial, automotiva, saúde, construção civil, entre outras. No setor aeroespacial, esta tecnologia permite o fabrico de componentes leves e altamente complexos, aumentando a performance das aeronaves [23]. Na indústria automotiva, a I3D é usada para criar peças personalizadas nomeadamente componentes internas com geometrias exclusivas como painéis de controlo, condutas de ventilação entre outras, permitindo construir veículos mais leves e eficientes [24]. Já na área da saúde, possibilita a produção de próteses à medida, bio modelos para planeamento cirúrgico e até tecidos biológicos [25]. A sua aplicação na indústria da construção ainda se encontra numa fase inicial, sendo a sua aplicação limitada à construção de casas térreas e sustentáveis, impressão de painéis de fachada, pilares personalizados e sobretudo como apoio às técnicas tradicionais [26].

A criação da peça impressa contempla as seguintes etapas: primeiro é necessário modelar a peça num software de modelação tridimensional. Em seguida, o arquivo é convertido para o formato Standard Tessellation Language (STL), estando pronto a ser importado para um software de fatiamento (*slicing*) que divide o modelo em camadas e gera o código de instruções (G-code) para a impressora, que contém informação sobre a posição cartesiana dos pontos das camadas (linhas), a velocidade de impressão e o fluxo de material debitado. O processo pode também ser articulado com metodologias BIM (Building Information Modeling), permitindo uma gestão mais integrada do projeto, desde a modelação digital à produção automatizada. Seguidamente, dá-se a impressão camada por camada seguido dos processos pós impressão como remoção dos suportes, limpeza e polimento, com vista à melhoria do aspeto final [27]. A Figura 3 mostra melhor em que consiste a sequência de etapas até à obtenção da peça impressa.

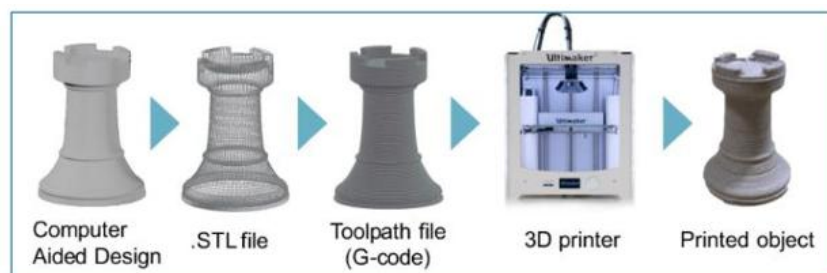


Figura 3 – Etapas de impressão 3D, adaptado de Gao et al. [28].

### 2.3.2. PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D PARA A CONSTRUÇÃO

Com o avanço dos estudos sobre I3D, diversos sistemas de MA têm sido desenvolvidos, cada um com características distintas que influenciam o processo e o resultado. De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2023 [29], os principais sistemas de impressão incluem: Binder Jetting (BJ), Directed Energy Deposition (DED), Material Extrusion (ME), Material Jetting (MJ), Powder Bed Fusion (PBF), Sheet lamination (SL) e Vat Photopolymerization (VP). Cada um desses processos utiliza materiais diferentes, o que influencia as propriedades do produto final, como a resistência mecânica, a precisão e o acabamento. Na Tabela 2 é descrito cada um dos sistemas de impressão com as respetivas vantagens e desvantagens. Escolher o sistema de impressão adequado é essencial para garantir a qualidade do produto final com as características pretendidas.

Tabela 2 – Processos de impressão.

| <b>Categoria</b>                     | <b>Definição [30], [31]</b>                                                                                                        | <b>Materiais</b>               | <b>Vantagens [32]</b>                                                             | <b>Desvantagens [32]</b>                                                          |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Binder Jetting</b>                | Deposição de um agente de ligação para unir materiais em pó                                                                        | Areia, cerâmica, gesso e metal | Baixo custo, rápido e compatível com vários materiais                             | Acabamento limitado                                                               |
| <b>Directed Energy Deposition</b>    | Processo de fabrico aditivo em que é utilizada energia térmica focalizada para fundir materiais à medida que vão sendo depositados | Metal                          | Produção de peças grandes e permite a criação de peças com diferentes composições | Alto custo, requer pós processamento e limitado em peças com geometrias complexas |
| <b>Material Extrusion (FDM)</b>      | Processo em que o material é distribuído seletivamente através de um orifício                                                      | Plástico, betão, cerâmica      | Baixo custo e fácil de trabalhar                                                  | Baixa velocidade e acabamento limitado                                            |
| <b>Material Jetting</b>              | Processo em que gotículas de material de construção são depositadas seletivamente                                                  | Metal e plástico               | Bom acabamento, compatível com vários materiais                                   | Tamanho de construção limitado, custo elevado                                     |
| <b>Powder Bed Fusion (SLS)</b>       | Processo de fabrico em que a energia térmica funde seletivamente de um leito de pó                                                 | Metal e plástico               | Liberdade de design, grande resistência                                           | Materiais limitado, custo elevado e processo complexo                             |
| <b>Sheet Lamination</b>              | Processo em que folhas de material são ligadas para formar um objeto                                                               | Papel e metal                  | Grande resistência e compatível com vários materiais                              | Custo elevado e processo complexo                                                 |
| <b>Vat Photopolymerization (SLA)</b> | Processo no qual é utilizada luz UV/laser para endurecer resina líquida, camada por camada, dentro de uma cuba                     | Plástico                       | Bom acabamento                                                                    | Baixa velocidade, custo elevado e materiais limitados                             |

### 2.3.3. NORMAS PARA IMPRESSÃO 3D

Atualmente, existe uma norma específica para a MA que se aplica à I3D na construção civil que estabelece as diretrizes específicas para a sua utilização. A ISO/ASTM 52939:2023 [29] especifica os requisitos de garantia de qualidade para projetos que utilizam a I3D como método construtivo, independentemente do processo e do material utilizado, à exceção dos metais.

A norma abrange diversos aspetos incluindo:

- Critérios para qualificação do processo de construção aditiva – A I3D atende a padrões de segurança e desempenho estrutural;
- Parâmetros para a infraestrutura da célula de I3D – Requisitos para o ambiente de produção, equipamentos e condições operacionais;
- Gestão de materiais e validação do processo – Controlo de qualidade e verificação das propriedades mecânicas;
- Requisitos de rastreabilidade e documentação – Sistema de registo detalhado para todas as etapas, assegurando transparência e conformidade.

#### 2.3.4. TECNOLOGIAS PIONEIRAS

O desenvolvimento de tecnologias para aplicação no setor da construção tem sido alvo de cada vez mais interesse por parte de universidades, investigadores e engenheiros, permitindo assim uma melhoria das tecnologias de I3D, tornando mais eficiente e sustentável [33]. Dependendo da forma e do design a imprimir, a tecnologia ideal deve ser escolhida levando em conta os custos das respectivas tecnologias. Concrete Printing, Contour Crafting e D-Shape são os métodos mais usados para estruturas de betão [34].

##### 2.3.4.1. Concrete Printing

Concrete Printing é uma técnica de I3D (Figura 4 a)) para o setor da construção que utiliza um sistema robótico em formato de pórtico para depositar as camadas de argamassa, desenvolvida por investigadores na Universidade de Loughborough, Reino Unido, em meados dos anos 2000. O material é depositado camada sobre camada segundo o processo de Material Extrusion, conforme visto acima [35]. Na Figura 4 b) é possível observar um protótipo e a respetiva impressora.

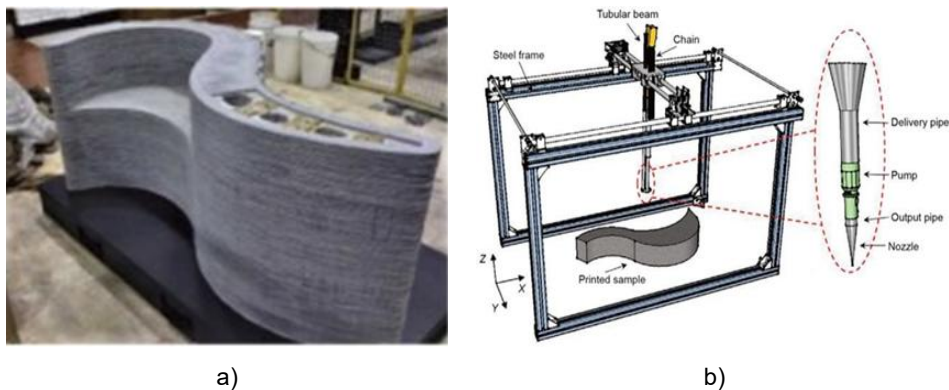


Figura 4 – a) Peça impressa através de Concrete Printing [35] e b) Impressora 3D Concrete Printing [36].

##### 2.3.4.2. Countor Crafting

Countour Crafting é uma técnica de I3D (Figura 5) que foi desenvolvida por Behrokh Khoshnevis, professor da Universidade da Califórnia do Sul no final dos anos 90 e inícios dos anos 2000. Assim como o método Concrete Printing, este também usa um sistema porticado para depositar as camadas de argamassa, no entanto o foco está na alta velocidade e na dimensão de construção, e que ainda pode incorporar reforços estruturais durante o processo de impressão [37].

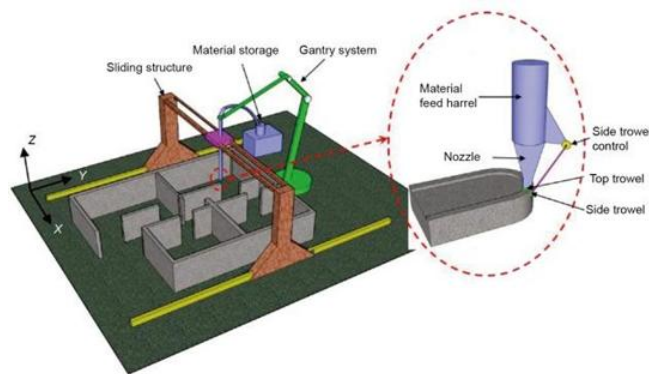


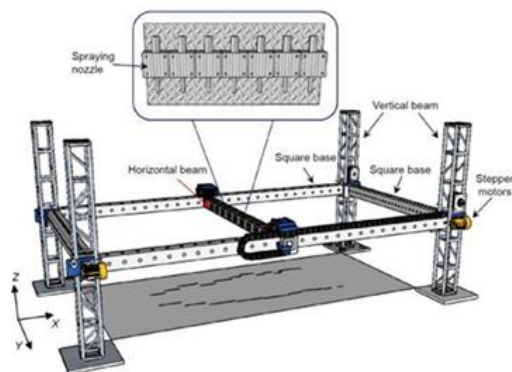
Figura 5 – Impressora 3D - Contour Crafting [36].

#### 2.3.4.3. D-Shape

D-Shape é um método que utiliza um processo que resulta de uma variação da I3D tradicional, desenvolvido por Enrico Dini no início dos anos 2000, que consiste na deposição de materiais (agregados, metais, areia ou cerâmicos) sobre o local onde a peça será desenvolvida sendo depois algutinados por um ligante, baseando-se no processo de Binder Jetting. É um dos processos mais indicados para cear formas complexas e de grande escala [38] como se pode observar na Figura 6 a). A impressora usada neste método de impressão é apresentada na Figura 6 b).



a)



b)

Figura 6 – a) Peça impressa em D-Shape [38] e b) Impressora 3D D-Shape [36].

#### 2.3.5. SISTEMAS DE IMPRESSÃO

##### 2.3.5.1. Sistema de Pórtico (Gantry)

O sistema de pórtico tem vindo a ser amplamente utilizado em impressoras 3D, nomeadamente na Construção Civil. Consiste numa estrutura composta por vigas e trilhos deslizantes que suportam e movimentam a cabeça de impressão nos eixos cartesianos X, Y e Z permitindo a deposição do material (Figura 7) [39].

Tem como principais características:

- Estrutura rígida: Minimiza as vibrações, garantido assim uma maior precisão quando está a imprimir [40].
- Movimentação precisa: Permite um controlo exato dos movimentos nos três eixos [41].

- Versatilidade de tamanho: A configuração e tamanho do sistema pode ser adaptado a diferentes escalas e necessidades, desde impressoras de pequeno porte até impressoras maiores usadas para construção de edifícios [39].

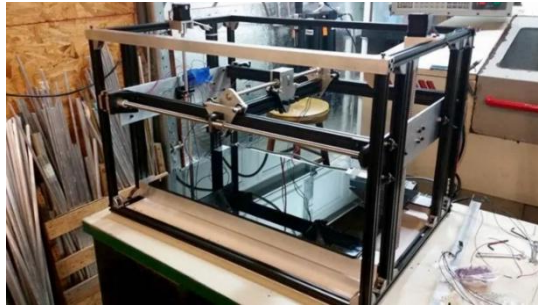


Figura 7 – Sistema de pórtico [42].

Outro exemplo dentro do sistema de pórtico é a Crane WASP, que se baseia numa estrutura de pórtico com os braços ancorados a uma base central, permitindo uma configuração circular de impressão (Figura 8 a)). A sua maior vantagem é a possibilidade de desmontagem fácil, transporte e montagem rápida em estaleiro, que torna particularmente interessante em cenários de emergência ou construções sustentáveis. Este sistema foi usado no projeto TECLA, um protótipo de habitação construída em terra e fibras (Figura 8 b)) [43].



Figura 8 – a) Sistema Crane WASP; b) Projeto TECLA [43].

#### 2.3.5.2. Braço Robótico

Assim como o sistema de pórtico, o braço robótico também é muito usado e consiste num braço mecânico articulado com um extrusor acoplado na ponta, com 6 graus de liberdade, por norma. Por vezes pode estar associado a carris para se mover em mais uma direção (Figura 9 a)). Uma equipa da Universidade de Biobío, no Chile construiu a primeira casa de betão (Figura 9 b)), impressa em 3D utilizando um robô industrial KUKA KR120, tem 30 m<sup>2</sup> e foi construída em 29 horas [44].

Características principais:

- Flexibilidade e mobilidade: Podem ser fixados numa posição fixa ou serem instalados em suportes móveis.
- Ocupação de espaço: Comparado aos sistemas de pórtico, os braços ocupam menos espaço e também podem ser montados em plataformas de transporte, permitindo tanto a instalação em obra como em fábrica.
- Precisão de movimentos e velocidade: Permitem a criação de geometrias mais arrojadadas dado as suas características.



a)



b)

Figura 9 – a) Braço robótico CyBe [45] e b) Casa Semilla [44].

#### 2.3.5.3. Sistema Delta

O sistema Delta distingue-se do sistema de pórtico e braço robótico, e consiste em três braços articulados que controlam o movimento do extrusor no espaço tridimensional, permitindo assim movimentos mais rápidos e fluídos comparado a outros sistemas, sendo particularmente eficaz para a criação de peças de dimensão mais reduzida e com grande detalhe. Um dos exemplos é a impressora Delta WASP 3MT (Figura 10) desenvolvida pela empresa WASP, uma referência no setor [46].



Figura 10 – Impressora Delta WASP 3MT [46].

#### 2.3.5.4. Outros processos

Nos últimos anos, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para ampliar a aplicação da impressão 3D na arquitetura e engenharia civil [AEC], permitindo a construção de estruturas complexas e de grande escala, como por exemplo os Minibuilders criados pelo IAAC, que consistem em pequenos robôs que trabalham em conjunto e imprimem estruturas maiores do que o seu tamanho (Figura 11 a)) [47]. Já a empresa Winsun criou um sistema de pórtico para a construção de várias casas, prédios e até outras estruturas, como pontes e escritórios. Um dos seus feitos mais mediáticos foi a impressão de 10 casas

em apenas 24 horas, o que demonstra o potencial da tecnologia para construções de grande escala [48]. A CyBe Construction utiliza braços robóticos para impressão diretamente no estaleiro. A Apis Cor criou um sistema que se baseia num guindaste rotativo que permite a impressão de edifícios completos (Figura 11 b)) [49].

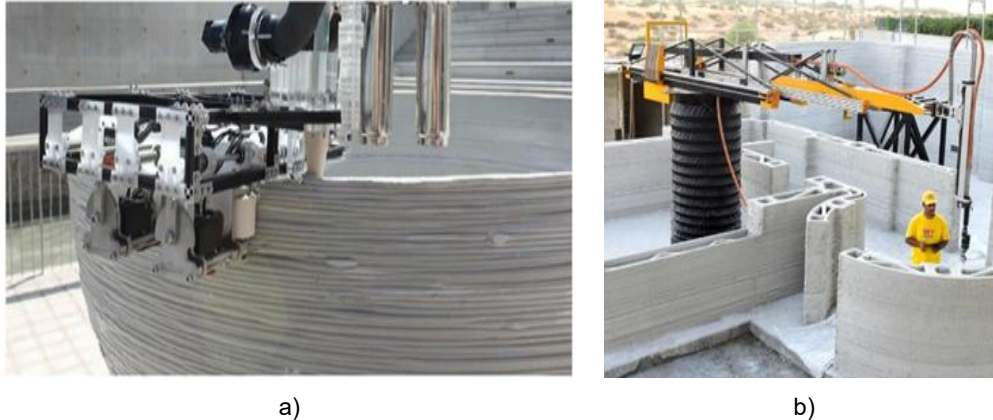


Figura 11 – a) Minibuilders [47] e b) Sistema de impressão 3D Apis Cor [49].

#### 2.3.6. EXEMPLOS DE IMPRESSÃO 3D NA REABILITAÇÃO

A indústria da construção ainda apresenta vários problemas, como atrasos onde 77% dos projetos são concluídos 40% depois do prazo acordado; desvios orçamentais, onde os custos em 98% das vezes ultrapassam em 30% o valor inicial [50]; baixa produtividade; escassez de mão de obra [51]. A I3D surge como uma alternativa viável, apesar de ainda ser vista como uma ferramenta auxiliar às técnicas de construção tradicionais, apesar de vir apresentando algumas aplicações na indústria da construção civil, como construção de edifícios, produção de elementos construtivos, estruturas pré-fabricadas, reabilitação de edifícios, entre outras.

Os edifícios históricos apresentam um valor inestimável, não só pela sua arquitetura, mas também pelo seu significado cultural, social e económico. Representam a memória e a identidade de uma sociedade, sendo testemunhos materiais de diferentes períodos históricos, resistindo no tempo mesmo tendo sido construídos com tecnologias e materiais limitados. A reabilitação de edifícios históricos apresenta vários desafios, particularmente no que diz respeito à compatibilidade, desempenho e outros parâmetros técnicos e funcionais, devendo ser intervencionada de forma a preservar o seu valor e a sua aparência.

No campo da preservação e reabilitação do património cultural, a I3D tem demonstrado grande potencial nomeadamente através da construção de elementos decorativos e estruturais, diferentes estudos vem explorando a aplicação dessa tecnologia combinando com técnicas como a digitalização 3D e a fotogrametria para criar modelos precisos das peças antes da sua impressão [52], [53].

Uma vantagem da I3D em relação às técnicas tradicionais é sua capacidade de produzir elementos altamente detalhados e personalizados, permitindo a adaptação a geometrias irregulares com uma grande variedade de materiais compatíveis. No entanto a durabilidade dos materiais quando expostos a condições desfavoráveis como humidades e radiação solar, é um aspeto que tem de ser avaliado [54]. Outro ponto interessante é a possibilidade de incorporar sensores óticos de fibra (FOSs) nas peças impressas de modo a monitorizar o comportamento das estruturas restauradas e produzidas, o que fornece informações valiosas sobre o estado geral do edifício. Esta tecnologia, já aplicada noutras metodologias de construção e reabilitação, pode ser particularmente vantajosa na impressão 3D, pois

permite a integração dos sensores durante o processo de fabrico, de forma controlada e precisa. Contudo, a incorporação destes sensores exige um controlo rigoroso do processo de impressão, pois pode influenciar as propriedades mecânicas da argamassa [55].

Um estudo de Xu et al. [52] demonstrou a viabilidade da integração entre a digitalização 3D e a MA para a conservação do património. A pesquisa concentrou-se na reconstituição de uma coluna pertencente a uma estrutura colonial chinesa do início do século XX, no campus na Universidade de Ciência e Tecnologia de Huazhong (HUST) na China que se apresentava degradada (Figura 12 c)). O processo começou com a digitalização 3D da peça com um scanner, foi utilizada uma argamassa à base de cimento com a incorporação de fibras e aditivos, os resultados obtidos foram muito positivos visto que a peça apresentou semelhanças geométricas com o plinto original e propriedades mecânicas muito satisfatórias. Contudo, o estudo identificou a necessidade de tratamentos complementares após a impressão para melhoria do acabamento superficial (Figura 13).



Figura 12 – a) Base sem degradação; b) Base semi degradada; c) Base muito degradada [52].



Figura 13 – Base impressa [52].

O estudo de Higuera et al. [53] investiga a aplicação da fotogrametria e da I3D na restauração de um ornamento Hispano-Romano, demonstrando como essas tecnologias podem ser aplicadas a reabilitação de forma eficaz. Primeiro começou por criar um modelo digital que reproduz o ornamento em estudo (Figura 14 a)) depois usando o método Fused Deposition Modeling (FDM) imprimiu a peça, o material utilizado foi o PLA branco, que é um material produzido com ácido polilático, que é um polímero termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis [12] para o resultado final ser similar ao original ainda colocaram uma base acrílica branca e adicionaram pigmento azul egípcio e pigmento natural Sienna earth (Figura 14 b)).

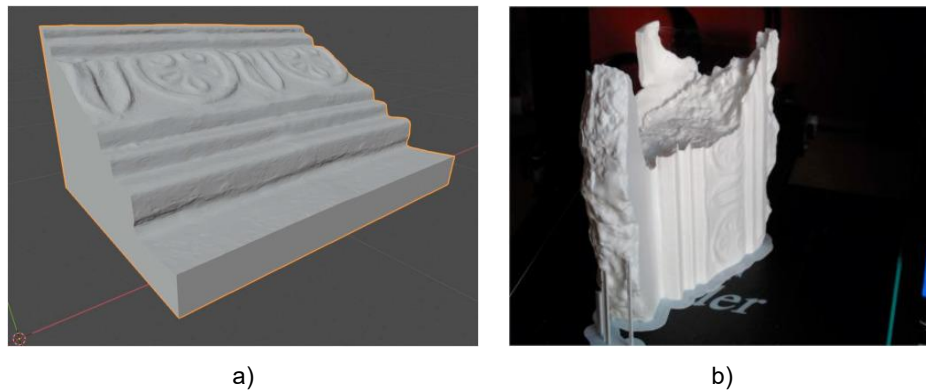


Figura 14 – a) Modelo 3D do ornamento [53] e b) Impressão 3D [53].

A empresa Holandesa Concr3de propôs restaurar partes da Catedral Notre-Dame, após o incêndio de 2019, a ideia passou por usar a I3D para recriar elementos que se perderam utilizando pó de calcário e cinzas do próprio incêndio. Para demonstração imprimiram uma réplica da gárgula “Le Stryge” (Figura 15 a)), usando uma impressora adequada para trabalhar com pedras e materiais semelhantes, que imprime qualquer geometria sem suporte [56]. Na Florida, uma Capela Annie Pfeiffer projetada por Frank Lloyd Wright foi reabilitada utilizando a I3D para recriar os blocos de betão ornamentais (Figura 15 b)) que se encontravam degradados através dos desenhos originais foram criados os moldes em plástico, que servira de base para a impressão. Estes moldes permitiram fabricar novos blocos de betão com areia rica em conchas, tal como os originais, mantendo a textura e a aparência pretendida [57].

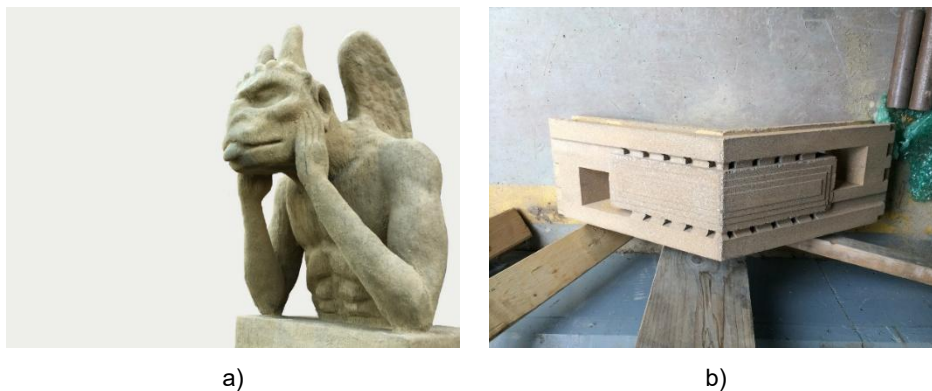


Figura 15 – a) Le stryge e b) Bloco de canto impresso.

O trabalho desenvolvido pela empresa EDG Architecture utilizou uma tecnologia para recriar elementos arquitetónicos danificados em edifícios históricos o caso em estudo é de um edifício na Quinta Avenida, datado de 1940, o método de I3D permitiu a fabricação de componentes detalhados e com um sistema de conexão de placas perfeito à construção inicial, de uma maneira mais barata, mais rápida do que a construção tradicional. Consiste em moldes plásticos ocos, que são reforçados com malha de arame e que depois são preenchidos com betão (Figura 16) [58].

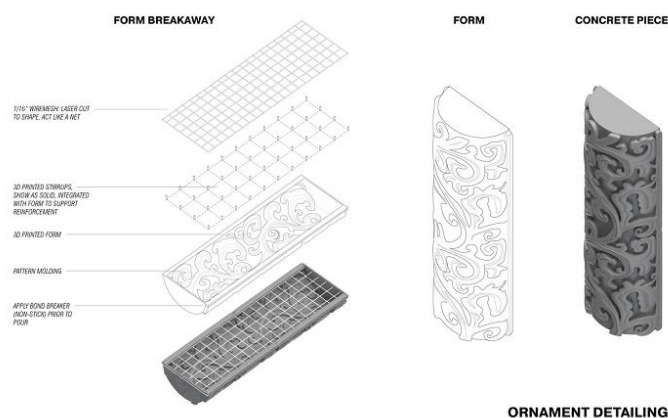


Figura 16 – Ornamentos [58].

Esta solução inovadora, que alia a criação de moldes de betão e a I3D permite desenvolver uma ampla variedade de acabamentos, formatos e padrões, o que se torna uma mais-valia para a construção de formas mais diferenciadas e arroçadas.

## 2.4. ARGAMASSAS E PROPRIEDADES

### 2.4.1. ARGAMASSAS USADAS NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL

A argamassa é um material de construção de composição variável, mas essencialmente que resulta da mistura de aglomerantes (proporcionam trabalhabilidade e elasticidade [59]), agregados (têm uma dupla função: ocupam espaço físico e fortalecem a estrutura [60]), água e aditivos [61], que desempenha um papel fundamental na construção, atuando como elemento de união entre alvenarias proteção contra agentes externos e contribuição estética porque muitas vezes são o acabamento final e têm funções de proteção das alvenarias, de decoração [62] permitindo também a redução da humidade presente na alvenaria [63], o que torna a sua manutenção de grande importância para a conservação de edifícios com valor patrimonial.

### 2.4.2. ARGAMASSAS À BASE DE CAL

As argamassas à base de cal, juntamente com as argamassas à base de terra, são as primeiras usadas pela para construção, com registos do uso da cal em construções antigas na Galileia (Israel) em 7000 a.C., pela civilização Síria já em 4250 a.C. [64], enquanto no Egito começaram a ser aplicadas por volta de 4000 a.C. [65]. Vestígios de revestimento utilizando cal foram também identificados pertencentes à civilização chinesa entre 2000 e 1700 a.C. [66]. Na Grécia antiga, a cal era usada para revestimentos decorativos e pinturas murais, sendo que os Romanos expandiram o seu uso para fins estruturais e aperfeiçoaram a argamassas de cal com a introdução de diferentes tipos de pozolanas [67], [68].

A cal usada para a construção é ordenada em três categorias: a cal hidráulica natural (NHL) que ainda é produzida através de métodos tradicionais; a cal formulada (FL), que resulta da combinação de hidróxido de cálcio com NHL e outros materiais; cal hidráulica (HL) que é produzida pela mistura de cal Hidráulica natural com cimento e materiais pozzolânicos [69]. A aplicação da argamassa de revestimento era feita manualmente, muitas vezes em camadas sucessivas para garantir um melhor acabamento e aderência [70].

O cimento Portland apareceu na segunda metade do século XIX, substituindo a cal que era dos ligantes mais usados naquela época [71]. No século XX, o cimento tornou-se o ligante mais usado nos diversos tipos de construções [72].

As argamassas utilizadas em construções antigas eram constituídas principalmente por cimento, cal, areia e outros aditivos naturais como pozolanas e fibras vegetais. O agregado fino (0-4 mm) era o que se usava em edifícios antigos [73]. A cal proporcionava flexibilidade e compatibilidade com os materiais dos edifícios históricos, evitando assim fissuras e danos estruturais [74].

Apesar disso, a aplicação de cimento em intervenções de restauro tem sido alvo de crítica por parte dos especialistas em conservação e reabilitação [75], uma vez que o cimento apresenta incompatibilidades com as alvenarias antigas construídas com a argamassa de cal. Os problemas relatados são a elevada rigidez, resistência mecânica excessiva, comportamento frágil, a tendência de fissuração, retração durante a cura e baixa permeabilidade ao vapor de água, o que pode acabar por comprometer a integridade das estruturas [72]. Um estudo de Pavlík Sbysek et al. sobre as argamassas para reabilitação, conclui que o recomendado é o uso de argamassas à base de cal para reabilitação de edifícios antigos [72].

As argamassas de cimento endurecem rapidamente, o que pode ser prejudicial para as estruturas antigas. Esta argamassa tem menor porosidade comparada com a argamassa de cal, o que resulta em maior retenção de humidade. Além disso, a sua rigidez excessiva pode danificar materiais porosos, como os tijolos e as pedras das alvenarias dificultando a remoção sem comprometer a integridade da estrutura [76].

Portanto, a primeira abordagem para a reabilitação deve passar por usar materiais usados inicialmente na construção, mas todas as abordagens de intervenções devem passar por uma análise inicial, inspeções do edifício para avaliar vários parâmetros, porque as composições acabam por variar bastante, e também devido a questões de compatibilidade de materiais que tem propriedades físicas, químicas e mecânicas diferentes [77].

As argamassas de reboco e revestimento seguem a norma EN 998-1 [78]. A Tabela 3 apresenta uma análise comparativa das propriedades das argamassas, destacando as diferenças entre as argamassas tradicionais e modernas.

Tabela 3 – Síntese das diferenças entre argamassas tradicionais e modernas.

| Característica                   | Argamassas de Cal                                  | Argamassas de Cimento                         | Referências |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|
| <b>Permeabilidade</b>            | Alta                                               | Baixa                                         | [79]        |
| <b>Flexibilidade</b>             | Alta                                               | Baixa (rígida)                                | [72], [74]  |
| <b>Compatibilidade Histórica</b> | Ideal para restauro                                | Risco de danos                                | [72]        |
| <b>Resistência Mecânica</b>      | Moderada (Suficiente para estruturas tradicionais) | Alta (pode sobrecarregar materiais antigos)   | [72]        |
| <b>Retração</b>                  | Baixa (menor fissuração)                           | Alta (tendência para retração durante a cura) | [72]        |

#### 2.4.3. ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D

A I3D para a construção permite o uso de uma grande variedade de materiais nomeadamente a incorporação de materiais reciclados e com reduzido impacto ambiental com diferentes propriedades, características e formatos, tendo sido já efetuados vários estudos sobre a sua aplicação na indústria da

construção para a tornar mais eficaz e sustentável [80], [81], [82]. A escolha dos materiais depende sempre do tipo de impressora [83].

Os materiais mais usados na I3D são as argamassas à base de cimento Portland. Contudo, dadas as limitações do equipamento a utilizar, estas contêm maior percentagem de cimento que as argamassas tradicionais, contribuindo para um aumento do impacto ambiental [84]. Os materiais cimentícios apresentam várias vantagens como um baixo custo, boa durabilidade, tempo de presa adequado, uma boa fluidez e uma boa resistência mecânica, nomeadamente à compressão, variando entre 20 e 150 MPa [85]. As argamassas podem ser optimizadas com aditivos, agregados finos, fibras e outros materiais sustentáveis [86], [87].

O impacto ambiental associado ao cimento Portland na construção é elevado.: a produção de betão é responsável por 9% das emissões de gases com efeito de estufa a nível global [88], e com isso tem sido alvo de estudos a incorporação de produtos industriais, como sílica de fumo [89], cinzas, cinzas de bagaço de canas-de açúcar [88], e até mesmo grafeno [90] com vista minimizar os impactos ambientais no setor da construção. O principal desafio está em obter misturas com boas propriedades mecânicas e com boas propriedades no estado fresco [49] com aplicação a I3D.

Nos últimos anos houve um aumento significativo das pesquisas e desenvolvimento de argamassas para I3D, nomeadamente à procura de agregados e ligantes alternativos para tentar reduzir o impacto ambiental associado ao cimento, com inclusão de materiais sustentáveis e de resíduos industriais. Para satisfazer as propriedades exigidas da argamassa para I3D, os agregados devem ser finos, o que se traduz em uma necessidade maior de cimento e maiores custos [91]. Argamassas para I3D são diferentes das argamassas tradicionais: o não uso de cofragem implica que a argamassa tenha uma grande resistência, para não haver colapsos e deformações das camadas inferiores, uma boa capacidade de construção (buildability) [92], entre outras propriedades já mencionadas ao longo desta revisão da literatura.

Jentel et al. [93] conduziu um estudo sobre a substituição da areia normal por areia reciclada em argamassas, concluindo que a maior angularidade das partículas recicladas melhora a interação entre os grãos. Contudo, para um agregado superior a 3.50 mm pode haver segregação da mistura, enquanto uma granulometria mais fina aumenta a compactação dos constituintes e a resistência, o que permitiu melhorias na capacidade de construção.

A Tabela 4 apresenta os principais componentes utilizados na formulação de argamassas encontrados na literatura.

Tabela 4 – Composição típica das argamassas.

| <b>Aglomerantes</b>                                                                                                                                                | <b>Agregados</b>                                                   | <b>Aditivos</b>                                                                           | <b>Outros</b>                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Cimento Portland<br>Cal hidráulica<br>Cinzas volantes<br>Sílica de fumo<br>Canas de açúcar<br>Grafeno<br>Cal hidráulica<br>Terra<br>Geopolímeros<br>Barro<br>Gesso | Areia do rio<br>Vidro reciclado<br>[94]<br>Areia reciclada<br>[93] | Acelerador<br>Retardador<br>Superplastificante<br>(SP)<br>Modificadores de<br>viscosidade | Fibras metálicas<br>Madeira [95]<br>Cerâmica<br>Água |

Teixeira et al. [92] calculou a composição média de várias argamassas para I3D como se observa na Figura 17.

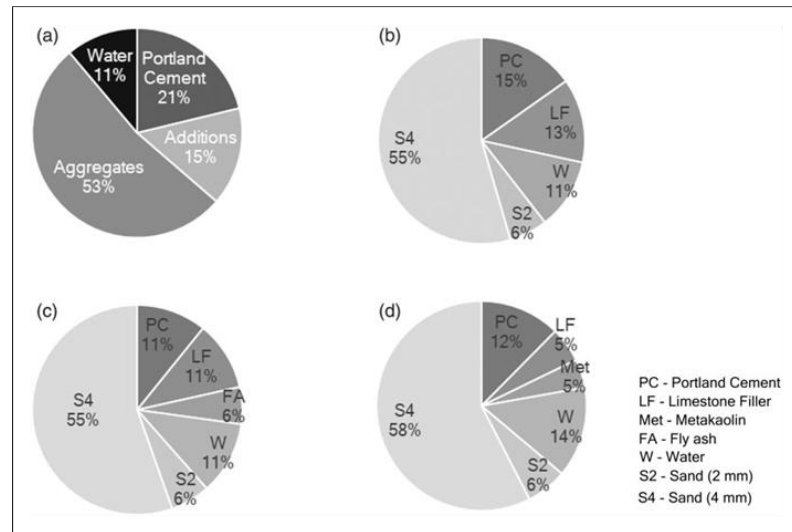


Figura 17 – Composição média de argamassa: (a) argamassa à base de cimento, (b) argamassa com fíler calcário, (c) argamassa com cinzas volantes e fíler calcário e (d) argamassa com metacaulino e fíler calcário [92].

Na literatura podemos encontrar várias argamassas. Um dos exemplos é uma à base de gesso, água, retardador, e outra com gesso, água e um acelerador induzido de calor, que tiveram um comportamento aceitável quando aplicado a I3D [96]. A CyBe, juntamente com a Korodur, desenvolveu uma argamassa designada CyBe mortor (Figura 18) para I3D. Apresenta boa durabilidade, bom comportamento estrutural e atinge resistência significativa em 1 hora. Além de ser uma argamassa sustentável, contém uma baixa quantidade de cloretos e sulfatos, permitindo uma redução do consumo de 32% de CO<sub>2</sub> em comparação com o cimento Portland [97].



Figura 18 – Argamassa da CyBe.

A Saint-Gobain também desenvolveu uma solução sustentável com propriedades otimizadas [98]. A substituição de agregados também foi tida em conta e uma solução com areia reciclada com bons resultados sem alteração das propriedades mecânicas também foi conseguida.

As construções em terra utilizam materiais como argila e o solo na sua composição, tendo já um longo historial na construção devido a serem materiais de baixo custo e com baixo impacto ambiental [99]. Podem ser extraídos sem grande complexidade de processos [100], trazendo outros benefícios como boa proteção ao fogo, reciclabilidade e boas propriedades térmicas [101]. Nos últimos anos, vários estudos têm explorado a incorporação desses materiais na I3D, como uma alternativa mais sustentável ao

cimento [102]. Apesar das boas propriedades térmicas, apresenta fraca performance a nível estrutural, surgindo a necessidade de incorporar fibras para reforçar as misturas [103], [104].

A empresa italiana WASP (World's Advanced Saving Project) imprimiu uma casa designada por “Gaia” (Figura 19 a) construída à base de terra crua e resíduos naturais. A mistura RH400-3D foi a utilizada na impressão, sendo constituída por 25% de solo retirado do local (30% de argila, 40% de lodo e 30% de areia), 40% de palha de arroz picada, 25% de casca de arroz e 10% de cal hidratada. Esta mistura atende a diferentes funções, como controlo de humidade relativa e isolamento térmico. A impressora utilizada foi a Crane WASP (Figura 19 b)) [105].



a)



b)

Figura 19 – a) Casa "Gaia" [105] e b) Impressora Crane WASP [105].

O Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) desenvolveu um projeto focado no uso materiais à base de solo, explorando misturas compostas por água, argila e areia para otimizar as suas propriedades [106].

Outros materiais como gesso e geopolímeros [107] também foram estudados. Em comparação com os materiais cimentícios são mais baratos e apresentam um baixo impacto ambiental. Apesar dos vários materiais estudados, as argamassas à base de cimento continuam a ser as preferidas para I3D. Na Tabela 5 são apresentados em resumo alguns dos materiais já aplicados e estudados para I3D assim como as respetivas vantagens e desvantagens da sua utilização.

Tabela 5 – Materiais alternativos. Adaptado de Perrot et al. [107].

| Material            | Características                                                     | Vantagens                                            | Limitações                                                             |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Terra</b>        | Terra natural, sílica, calcário e argila                            | Propriedades térmicas                                | Limitada resistência mecânica e baixa resistência a água               |
| <b>Geopolímeros</b> | Cinzas volantes, escória granulada, sílica, geopolímeros e aditivos | Melhora o controlo reológico, aumenta o tempo aberto | Resistência limitada, pós processamento necessário, causa encolhimento |
| <b>Gesso</b>        | Gesso, areia                                                        | Grande precisão e é reciclável                       | Causa encolhimento e rachaduras                                        |

#### 2.4.4. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A qualidade de uma boa impressão está diretamente relacionada a diversas características dos materiais no estado fresco e endurecido [108]. Essas características contemplam a fluidez, a trabalhabilidade, a resistência das camadas e a estabilidade da estrutura durante o processo de impressão, devido à ausência de cofragem. A maioria dessas propriedades foi estudada para materiais cimentícios, mas também são

fundamentais para outros materiais utilizados na I3D. Os materiais usados têm de ser capazes de suportar as camadas anteriores e assim sucessivamente. O sucesso da impressão depende da relação harmoniosa entre as propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

As propriedades no estado fresco consideradas para materiais para I3D encontram-se descritas abaixo [109], [110], [111] :

- *Trabalhabilidade (Workability)* – É a facilidade com que material pode ser transportado, manipulado e aplicado sem comprometer a sua consistência. Contudo, se for muito fluído, pode levar ao colapso da estrutura.
- *Fluidez (Flowability)* – É uma das propriedades mais importantes que se refere à habilidade da mistura em fluir e manter-se estável sob pressão. Se o material não possuir fluidez suficiente, não pode ser bombado com qualidade. A fluidez pode ser avaliada através de ensaios de abaixamento, fluidez e funil em “v” [110]. Os ensaios de abaixamento e fluidez são os preferenciais para avaliar a fluidez, como se pode observar na Figura 20.
- *Capacidade de Construção (Buildability)* – É a capacidade de uma camada manter a sua forma estando sujeita ao peso de sucessivas camadas depositadas sobre si. Um equilíbrio entre a rigidez e a flexibilidade é essencial para não haver deformações. A composição da mistura, assim como o uso de aditivos, podem melhorar a capacidade de construção. Apesar de ser um fator importante na avaliação de uma mistura para I3D, atualmente não há ensaios estabelecidos para o efeito.
- *Extrusão (Extrudability)* – É a capacidade de o material passar continuamente pelo bico sem comprometer a impressão e garantido a deposição de camadas uniformes. A análise visual é uma prática comum para verificar a qualidade desta propriedade, que depende da consistência e da coesão da mistura.
- *Capacidade de Bombagem (Pumpability)* – É a capacidade de uma mistura ser bombada da misturadora até a impressora. Está relacionada com a fluidez, portanto se uma mistura tiver uma boa fluidez deverá ter também uma boa capacidade de bombagem.
- *Tempo de Abertura (Open Time)* – É o intervalo de tempo em que o material mantém a sua trabalhabilidade e permite uma impressão eficiente.
- *Retenção da Forma (Shape Retention)* – É a capacidade de após feita a impressão o material manter a sua forma sem grandes deformações. Depende da composição da mistura e da taxa de hidratação.
- *Adesão entre Camadas (Interlayer Adhesion)* – É a capacidade das camadas se relacionarem entre si, sendo essencial para garantir a integridade estrutural da peça impressa, além de reduzir o risco de fissuras.
- *Printabilidade (Printability)* – É a capacidade de a mistura ser depositada em camadas sucessivas sem haver deformações durante o processo de impressão, estando dependente da capacidade de retenção de forma e da reologia (Figura 21).
- *Exsudação* – É a propriedade da argamassa no estado fresco que se refere à libertação de água pela superfície da argamassa antes do seu endurecimento.

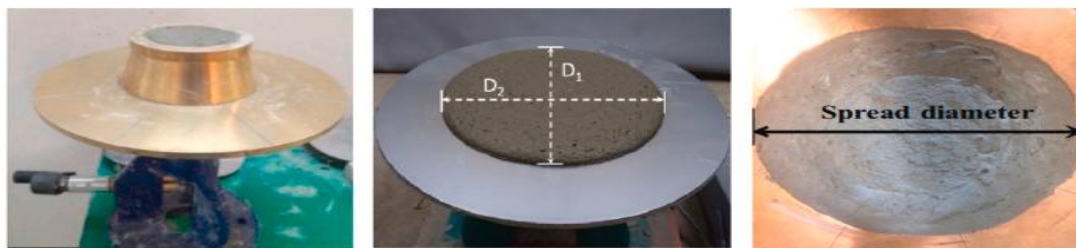


Figura 20 – Ensaio da mesa de espalhamento [110].



Figura 21 – Exemplo de printabilidade.

#### 2.4.5. PROPRIEDADES REOLÓGICAS

As propriedades reológicas normalmente consideradas encontram-se descritas abaixo [112], [113]:

- *Reologia (Rheology)* – Influencia diretamente o resultado da impressão e é a ciência que estuda fatores de deformação e fluxo da matéria quando sujeitas a tensões sejam elas normais e/ou de cisalhamento. Fatores como a elasticidade, o escoamento e a viscosidade afetam a estabilidade da impressão [110]. Os parâmetros principais são tensão de rendimento estático, tensão de rendimento dinâmico, viscosidade plástica e tixotropia.
- *Tensão de Cisalhamento (Shear Stress)* – É a tensão aplicada paralelamente ou tangencialmente a uma superfície do material.
- *Tensão de Escoamento Estático (Static Yield Stress)* – É o valor máximo da tensão de cisalhamento para se iniciar o fluxo de material, quando é muito alto pode levar a interrupções durante o processo de impressão.
- *Tensão de Escoamento Dinâmico (Dynamic Yield Stress)* – É o valor mínimo para que continue a haver fluxo de material.
- *Tixotropia (Thixotropy)* – É quando há uma diminuição da viscosidade (mais fluído), devido a um aumento da tensão de cisalhamento. Quanto maior a diferença entre a tensão de escoamento estático e dinâmico, maior será a reologia.
- *Viscosidade Plástica (Plastic Viscosity)* – É a resistência de um material a fluir quando é forçado a se mover.

#### 2.4.6. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO [114]

Depois da impressão é importante que a peça impressa tenha algumas características relevantes. Segundo Kazemian et al. [115] essas características de qualidade são: peça sem defeitos, dimensões das camadas uniformes e sem deformações excessivas.

- *Resistência Mecânica (Mechanical Strength)* – Avaliação da resistência à compressão, tração e flexão, podendo ser aos 7, 14 e/ou 28 dias.
- *Estabilidade Dimensional* – Garantir que as dimensões da peça impressa estão em conformidade com as do projeto original [92].
- *Baixa Retração* – Garantir a estabilidade da peça, para evitar fissurações e encolhimento.
- *Textura* – Qualidade superficial da peça após impressão e secagem.
- *Cor* – Pode ser alterada com a substituição dos agregados ou uso de pigmentos.

Existem ainda outras características nomeadamente da impressora que precisam ser levadas em consideração o tipo de impressora a capacidade da impressora, capacidade de bombagem, diâmetro do bico, a sua geometria e altura [116], a velocidade de impressão e o tempo entre a deposição de uma camada e outra [117]. Estas características vão afetar diretamente o tipo de materiais a selecionar e o resultado da peça impressa.

#### 2.4.7. ENSAIOS E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

A caracterização de argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, é bastante importante para avaliar as suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e hídricas. Estes ensaios, realizados segundo normas europeias e internacionais garantem a sua adequabilidade quer em novas construções ou na reabilitação. A Tabela 6 inclui alguns ensaios normalmente utilizados para avaliação de propriedades de argamassas. Contudo, devido a constrangimentos temporais, avaliaram-se apenas: trabalhabilidade, resistências à compressão, flexão e coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Tabela 6 – Ensaio para argamassas.

| Propriedade                                       | Símbolo, Unidade                                         | Definição                                                                                                                                               | Norma(s)                |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Mistura                                           | —                                                        | Coletar uma amostra da argamassa no estado fresco e preparar a amostra para ensaios                                                                     | EN 12015-2              |
| Trabalhabilidade                                  | F, mm                                                    | Determinar a consistência da argamassa fresca por meio do ensaio de espalhamento (Flow Test)                                                            | EN 1015-3               |
| Densidade aparente                                | $P_m$ , Kg/m <sup>3</sup>                                | Razão entre a massa da argamassa fresca e o volume ao ser ocupado ao ser inserida de maneira padronizada num recipiente de medição                      | EN 1015-6<br>EN 1936    |
| Teor de ar incorporado                            | A, %                                                     | Determinação do teor de ar da argamassa fresca incluindo aqueles com ou sem qual, utilizando o método medidor de pressão                                | EN 1015-7               |
| Tempo de correção                                 | $t_c$ , min                                              | Tempo no qual a argamassa recém-aplicada pode ser ajustada ou corrigida sem comprometer significativamente seu desempenho ou aderência                  | EN 1015-9               |
| Teor de cloretos                                  | Cl <sup>-</sup> , % em massa                             | Determinação da quantidade de cloretos solúveis em água na argamassa fresca, importante para evitar corrosão em materiais de reforço                    | EN 1015-17              |
| Resistência à flexão e compressão                 | $R_f$ , MPa<br>$R_c$ , MPa                               | O ensaio de flexão mede a força necessária para dobrar um corpo de prova; o ensaio de compressão mede a força aplicada até a ruptura sob carga uniaxial | EN 1015-11<br>EN 196-1  |
| Aderência a diferentes substratos                 | $\tau_a$ , MPa                                           | Determinação da aderência da argamassa endurecida a substratos por meio do ensaio de arrancamento ("pull-off test")                                     | EN 1015-12              |
| Densidade aparente seca                           | $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>                               | Razão entre a massa da argamassa endurecida e o volume ocupado                                                                                          | EN 1015-10              |
| Estabilidade dimensional                          | $\Delta L$ , mm                                          | Avaliação da variação dimensional da argamassa ao longo do tempo, especialmente durante a secagem, para verificar retração ou expansão                  | EN 1015-13              |
| Módulo dinâmico de elasticidade                   | $E_d$ , GPa                                              | Determinação do módulo dinâmico de elasticidade em pedras naturais                                                                                      | EN 14146                |
| Número de rebote                                  | R, —                                                     | Determinação da dureza superficial da argamassa endurecida pelo ensaio de martelo de Schmidt                                                            | EN 12504-2              |
| Coefficiente de absorção de água por capilaridade | $A_w$ , Kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )           | Quantidade de água absorvida por unidade de área em função do tempo                                                                                     | EN 1015-18<br>ISO 15148 |
| Permeabilidade ao Vapor de água                   | $\delta_p$ , Kg/(m·s·Pa)                                 | Taxa de fluxo de vapor de água por unidade de gradiente de pressão na direção do fluxo                                                                  | EN 1015-19<br>ISO 12572 |
| Difusividade da Humidade                          | $D_w$ , m <sup>2</sup> /s                                | Relação entre a permeabilidade ao vapor de água e a capacidade volumétrica de humidade                                                                  | ASTM E96                |
| Porosidade total                                  | $\xi$ ou $\psi$ , %<br>ou m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | Volume de vazios em relação ao volume total do material                                                                                                 | EN 15901-1<br>EN 1936   |
| Curva higroscópica                                | w ( $\phi$ )                                             | Relação entre o teor de humidade em equilíbrio no material poroso e a humidade relativa do ambiente                                                     | ISO 12571               |
| Teor de humidade de saturação                     | $W_{sat}$ , %/<br>$A_b$ , %                              | Razão entre a massa saturada e a massa seca da amostra.                                                                                                 | EN 13755                |

## **2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

Este capítulo apresenta uma revisão aprofundada da literatura, abordando temas que vão desde a reabilitação do património construído, até às tecnologias de I3D, com particular enfoque nas suas aplicações na indústria da construção, nomeadamente na reabilitação de edifícios e no desenvolvimento de argamassas, bem como nas suas propriedades relevantes.

A integração da I3D nos processos de reabilitação e conservação do património representa um avanço significativo no domínio das tecnologias construtivas. Enquanto as metodologias tradicionais, embora consolidadas, enfrentam diversas limitações, incluindo a necessidade de mão de obra especializada, a I3D possibilita a otimização dos processos, promovendo maior eficiência e precisão. Contudo, a sua aplicação em património classificado deve respeitar princípios fundamentais de conservação, como os estabelecidos na Carta de Veneza, de modo a garantir a integridade histórica e cultural dos bens intervencionados.

No que respeita aos materiais utilizados em I3D, observa-se uma diversidade crescente de soluções. Os materiais cimentícios continuam a ser os mais utilizados, dada a sua disponibilidade e propriedades mecânicas favoráveis. Contudo, materiais alternativos, como os à base de terra, argila, polímeros ou gesso, têm sido explorados como opções promissoras, especialmente em contextos específicos de reabilitação. A escolha do material condiciona, inevitavelmente, a seleção do equipamento de impressão, nomeadamente no tipo de impressora, capacidade de extrusão, geometria do bico e parâmetros de operação.

As argamassas continuam a desempenhar um papel central, tanto do ponto de vista funcional como estético. Compostas por ligantes, agregados, água e aditivos, servem não só como elemento de união, mas também como proteção e acabamento. As argamassas à base de cal são especialmente valorizadas na reabilitação de edifícios históricos, pela sua compatibilidade físico-química com os materiais originais. Em contrapartida, as argamassas modernas à base de cimento apresentam frequentemente problemas de incompatibilidade, podendo induzir danos nas estruturas antigas.

A qualidade da I3D depende fortemente das propriedades das argamassas, sobretudo no estado fresco. Características como fluidez, trabalhabilidade, capacidade de construção em camadas sucessivas, tempo de abertura e adesão entre camadas são cruciais para garantir a estabilidade do elemento impresso, dispensando o uso de cofragem. As propriedades reológicas, como a tensão de cedência e a viscosidade plástica, são determinantes na resposta da mistura ao processo de extrusão e na sua capacidade de modelação. No estado endurecido, os elementos impressos devem apresentar resistência mecânica adequada, estabilidade dimensional, baixa retração, bom acabamento superficial e compatibilidade cromática, requisitos essenciais sobretudo em intervenções de conservação.

Ao longo do capítulo são também apresentados diversos casos de estudo que ilustram a aplicação da I3D na reabilitação de edifícios e artefactos, evidenciando o papel crucial da digitalização tridimensional. Exemplo disso é a recriação de elementos ornamentais de tradição Hispano-Romana, onde a integração entre digitalização e I3D permite restaurar peças com elevado nível de detalhe e adaptá-las a contextos específicos de intervenção.

Assim, a I3D não surge apenas como uma tendência emergente, mas como uma ferramenta de elevado potencial para o futuro da reabilitação, capaz de aliar inovação tecnológica à preservação do património histórico. Ainda assim, subsistem desafios técnicos e científicos que exigem investigação contínua e aprofundamento metodológico.



## 3

## CASO DE ESTUDO

## 3.1. ENQUADRAMENTO

No seguimento da revisão da literatura efetuada no capítulo anterior, este capítulo aborda os procedimentos laboratoriais associados à otimização de argamassas. O foco principal é o desenvolvimento de argamassas adequadas para aplicação em edifícios com valor patrimonial, nomeadamente das mísulas do TNSJ, fazendo a caracterização da sua composição e das suas propriedades no estado fresco e endurecido.

O primeiro passo foi a definição das composições a serem testadas, tomando como referência o caso de estudo das mísulas do TNSJ. Para tal, foi necessário estabelecer a proporção adequada de cada constituinte. A cada nova impressão, as misturas foram analisadas e ajustadas com o objetivo de alcançar um desempenho adequado para I3D, assegurando a fluidez necessária para a extrusão, a aderência entre camadas e a resistência mecânica adequada pós cura. O flowchart apresentado na Figura 22 sistematiza a abordagem experimental desenvolvida para otimização das argamassas.

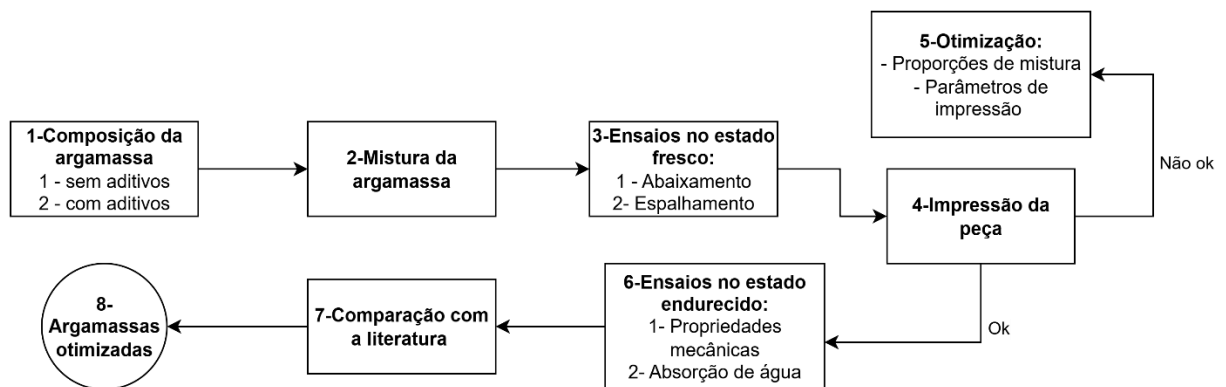


Figura 22 – Plano experimental.

## 3.2. HISTÓRIA E REABILITAÇÃO DO TEATRO NACIONAL SÃO JOÃO

O teatro Nacional São João (TNSJ) localizado na praça da Batalha no Porto (Figura 23 a)) começou a ser construído em 1910 no mesmo local após um incêndio (1908) que destruiu o teatro existente designado por Real Theatro do Príncipe, de autoria de Vincenzo Mazzoneschi. O arquiteto responsável pelo novo projeto foi José Marques da Silva (1869-1908), sendo que o teatro apresenta um estilo neoclássico que combina decorações escultóricas de influência grega e romana, contendo vários

elementos como balaustradas, estátuas, carrancas (máscaras), mísulas entre outros. O TNSJ foi inaugurado em 1920 e está classificado como monumento Nacional desde 2012 [118].

Os elementos originais decorativos das fachadas são em argamassa de cimento e cal, armada com rede de galinheiro e varões metálicos, mas é uma técnica construtiva com pouco conhecimento, devido à falta de documentação existente [119].

As mísulas (Figura 23 – a) Fachada Teatro Nacional São João [120] e b) Mísula original do TNSJ [120].Figura 23 b)) são elementos arquitetónicos, geralmente projetados para sustentar cornijas, varandas ou outros elementos de um edifício, podendo ser de pedra, madeira ou metal. As mísulas originais eram ocas e constituídas por argamassa de cimento e cal com rede de galinheiro, não tendo qualquer função estrutural [120]. A parte inferior de formato curvo era fixada a fachada por dois varões metálicos e nivelada através de arames zincados (Figura 24 a)); já a parte superior, tinha uma forma de “U”, conhecida como gaveta, encaixando-se na peça inferior que depois seria finalizada, ver Figura 24 b).



Figura 23 – a) Fachada Teatro Nacional São João [120] e b) Mísula original do TNSJ [120].

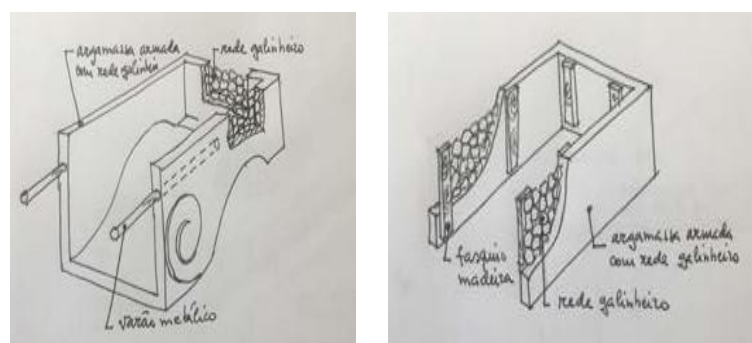


Figura 24 – a) Parte inferior [120] e b) Gaveta da mísula [120].

O TNSJ tem sido alvo de várias intervenções de manutenção e reabilitação ao longo dos anos, sobretudo os elementos decorativos das fachadas devido à corrosão das armaduras. Segue-se uma descrição das ações levadas a cabo ao longo dos anos:

1993 – 1995 – O teatro foi submetido a uma profunda intervenção de restauro, sob a responsabilidade do Arquiteto João Carreira e do Instituto Português do Património e Arquitetónico e Arqueológico (IPPAR);

2006 – Começam a cair pedaços de argamassa dos elementos das fachadas sobre a via pública devido à sua degradação (Figura 25);



Figura 25 – Mísula fingida degradada [120].

2009 – Foi realizada uma intervenção para remover as argamassas deterioradas, sobretudo nos revestimentos externos e em elementos ornamentais [121]. Foi também realizada uma inspeção sobre o estado de conservação das fachadas;

2013 – 2014 – Esta intervenção foi levada a cabo pelo Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IC-FEUP) que permitiu conhecer melhor os materiais e as técnicas utilizadas na construção original. Os elementos danificados como cornijas e as mísulas foram substituídas. Os elementos que se encontravam em bom estado foram mantidos;

2021 – O teatro passou por uma modernização ao nível do palco, substituição das quarteladas, introdução de varas motorizadas e atualização dos sistemas elétricos e mecânicos. A intervenção teve um investimento de 1,65 milhões, com 85% de financiamento comunitário e durou cerca de nove meses [122];

2022 – Foi realizada mais uma intervenção ao nível da fachada, incluído limpeza e recuperação de esculturas e elementos decorativos [123].

As argamassas usadas no TNSJ foram estudadas pela Universidade de Aveiro, tendo sido conduzidos vários ensaios de laboratório: difração raio X, microscopia ótica e eletrónica, análise química via humidade e análise granulométrica dos agregados. Os resultados dos ensaios mostraram que a maioria das amostras não continham compostos hidratados. Os silicatos de cálcio anidro, presentes no cimento Portland, foram verificados em quase todas as amostras estudadas [121].

As argamassas estudadas pela Universidade de Aveiro para reparar as mísulas do TNSJ são apresentadas na Tabela 7 e serviram de base para as argamassas a usar para I3D presentes nesta dissertação.

Tabela 7 – Estudo de argamassas TNSJ.

| Amostra | Ligante (50%)                                                   | Agregado (50%)        | Água (ml) |
|---------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| A       | 75% de cimento Vicat + 25% de cal NHL 3.5                       | Areia do rio (0-2 mm) | 200       |
| B       | 60% de cimento Vicat + 20 % de cal NHL 3.5 + 20% de cal NHL 5.0 |                       |           |
| C       | 50% de cimento Vicat + 50% de cal NHL 3.5                       |                       |           |

### 3.3. MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do trabalho experimental de laboratório das argamassas para I3D, os materiais foram escolhidos com base nas suas características, compatibilidade com o caso de estudo e disponibilidade.

#### 3.3.1. EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO 3D E SISTEMA DE EXTRUSÃO

A impressora utilizada foi a Delta WASP 40100 (Figura 26 a)). A tecnologia de impressão utilizada designa-se por LDM, sendo possível imprimir com vários materiais como cerâmicas, argilas, cimento, geopolímeros e outras misturas (Figura 26 b)). Outras características importantes da impressora são apresentadas na Tabela 8. Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros recomendados para a impressora utilizada na impressão.

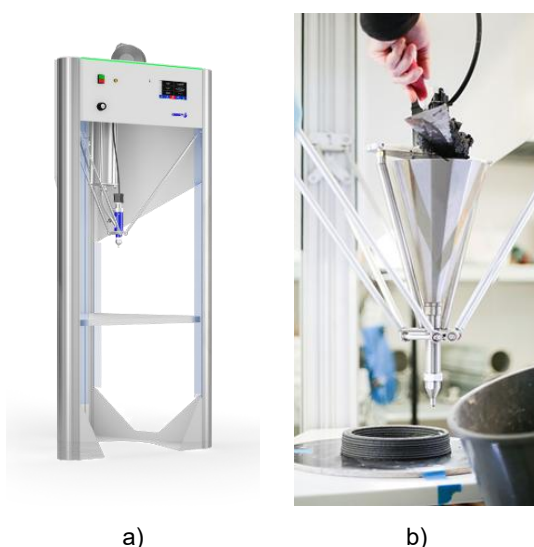


Figura 26 – a) Impressora Delta WASP 40100 [124] e b) Extrusor utilizado [124].

Tabela 8 – Características da impressora Delta WASP 40100 [124].

| Característica              | Descrição                                                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Área de impressão           | 400 mm (diâmetro) x 1000 mm (altura)                                                                    |
| Capacidade do extrusor      | 2.50 L de material                                                                                      |
| Bicos disponíveis           | 6 mm e 8 mm de diâmetro                                                                                 |
| Controlo de fluxo           | Motor de passo conectado a um parafuso sem-fim para regulação da saída do material                      |
| Sistema da mistura          | Pá interna que mantém o material homogéneo durante a extrusão (não mistura os componentes da argamassa) |
| Espessura da camada (layer) | De 0.50 mm a 5 mm                                                                                       |
| Velocidade de impressão     | Máximo 150 mm/s                                                                                         |

Tabela 9 – Parâmetros de impressão para a Delta WASP 40100.

| Velocidade de impressão (mm/s) | Fator de extrusão (ideal) | Altura de camada                     | Espessura de camada                    |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 30-50                          | 80%-150%                  | 30%-50% do diâmetro do bico (nozzle) | 100%-170% do diâmetro do bico (nozzle) |

### 3.3.2. ARGAMASSAS

As argamassas para I3D devem apresentar um conjunto de características especiais para garantir um bom desempenho, nomeadamente ter uma boa trabalhabilidade que influencia a facilidade de mistura e manuseio, extrudabilidade, essencial para que a argamassa seja extrudida de forma contínua e sem falhas, printabilidade, que assegura a manutenção da forma da estrutura sem colapsar e sem sofrer deformações acentuadas, adesão entre camadas e a resistência mecânica, entre outras propriedades que estão apresentados na página 22.

Atualmente, vários materiais têm sido aplicados a I3D como demonstrado no capítulo 2. Para atender a essas exigências e ao mesmo tempo garantir a compatibilidade com a reabilitação do TNSJ, a seleção de materiais foi feita com base na sua adequação ao contexto da construção histórica.

Os principais componentes utilizados na formulação das argamassas foram:

**Ligantes:** Cal Hidráulica HL5 da marca Secil (Figura 27 b)) e cimento CEM I 52,5N (Br) (Figura 27 a)) também da marca Secil;

**Agregado:** Utilizou-se areia do rio com granulometria controlada inferior a 1 mm, garantindo uma distribuição homogênea;

**Água:** Água da torneira de uso corrente;

**Aditivos:** Foi usado um SP (Chryso optima 206, à base de policarboxilatos) para diminuir a quantidade de água das misturas.



a)

b)

Figura 27 – a) CEM I 52,5N (Br) e b) Cal Hidráulica HL5.

Para a formulação das argamassas foi utilizada a combinação referida acima em substituição dos materiais inicialmente previstos: cimento Vicat, cal hidráulica natural parda NHL 3.5 e cal hidráulica St. Astier NHL 5.0, materiais utilizados nas intervenções de reabilitação conduzidas pela Universidade

de Aveiro. A alteração deveu-se à indisponibilidade dos componentes originais, pelo que se escolheram materiais com características hidráulicas equivalentes, disponíveis de imediato no laboratório.

### 3.3.3. OUTROS EQUIPAMENTOS

Para garantir a correta homogeneização das argamassas desenvolvidas, foi utilizada uma misturadora elétrica da marca Kenwood (Figura 28), apesar de ser um equipamento destinado a uso culinário, demonstrou-se eficaz na preparação de pequenas quantidades de argamassa. A misturadora possui 6 velocidades diferentes, ajustadas durante o processo de mistura.



Figura 28 – Misturadora.

Além dos materiais e equipamentos principais, foram utilizados materiais auxiliares como a balança digital com uma precisão de  $\pm 0.05$  g para medir a quantidade a usar dos constituintes de forma precisa, a base da impressão foi sempre em madeira escolhida pela sua estabilidade e compatibilidade com a impressora. O modelo 3D utilizado para imprimir foi uma peça mais simples do que as mísulas do TNSJ para facilitar o processo de impressão e a avaliação das propriedades enquanto se gastava menos material.

## 3.4. PROCESSO DE MISTURA

Com base na composição da peça inicialmente construída e com as características necessárias para aplicar a argamassa a I3D, optou-se por usar uma argamassa com 70% de ligante e 30% de agregados e outra constituída por 60% de ligante e 40% de agregados. Para cada ensaio de impressão foi preparada uma quantidade padrão de 1 kg de ligantes + agregados, que é o suficiente para imprimir a peça teste. As formulações testadas estão resumidas na Tabela 10, onde se apresentam as proporções de ligante e agregado utilizadas nas misturas. Como revisto na literatura, o tipo de impressora também vai ter influência nas composições desenvolvidas.

Tabela 10 – Formulações de argamassa testadas.

| Mistura | Ligante<br>(Cal + Cimento) | Agregado<br>(Areia) |
|---------|----------------------------|---------------------|
| A1      | 70%                        | 30%                 |
| B1      | 60%                        | 40%                 |

A preparação das misturas é um processo fundamental para garantir a qualidade e a consistência do material extrudido. Embora seja um procedimento relativamente simples, requer cuidados para evitar erros nas dosagens, que acabam por comprometer a viabilidade do estudo.

O primeiro passo consiste na pesagem precisa de todos os constituintes da argamassa (ligantes, agregados, aditivos e água) através balança digital com uma precisão de  $\pm 0,05$  g (Figura 29 a)). Após a pesagem, os materiais secos são colocados na misturadora e misturados durante cerca 1 minuto na velocidade mínima 30-60 rpm, garantindo que os componentes estão distribuídos de maneira homogênea para reduzir o risco de segregação e assim melhorar a trabalhabilidade da argamassa. De seguida, a água é adicionada e é misturada por 2.30 minutos com um aumento progressivo da velocidade da misturadora (100 a 200 rpm) (Figura 29 b)). Posteriormente, todo o balde e pá são raspados para garantir que toda a argamassa é propriamente misturada, seguindo-se mais 2.30 minutos de mistura.

São então realizados os ensaios no estado fresco, sendo que, por fim, a argamassa é misturada por mais 2 minutos antes de ser colocada no extrusor. Este protocolo de preparação foi seguido em todas as composições testadas, garantindo que as variáveis fossem minimamente controladas.



Figura 29 – a) Pesagem dos componentes e b) Mistura da argamassa.

### 3.5. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco são bastante importantes para avaliar a consistência da argamassa, nomeadamente os ensaios de abaixamento e espalhamento. A Tabela 11 apresenta as principais propriedades avaliadas com estes dois ensaios e indica os critérios que definem um desempenho adequado da argamassa e respetivos fatores capazes de comprometer a sua qualidade. Além desses parâmetros, outras propriedades foram revistas na literatura e podem influenciar diretamente o desempenho da argamassa, uma delas é a capacidade de bombagem e outra delas é o tempo de abertura, ou seja, o tempo que uma mistura permanece trabalhável após estar exposta e ser produzida. Nos testes realizados, as argamassas foram impressas logo após serem misturadas, cerca de 60 a 120 segundos, que é o tempo para colocar a argamassas no cone da impressora.

Tabela 11 – Critérios de avaliação da argamassa.

| Propriedades da argamassa       | Aceitável                          | Não aceitável                                                                         |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fluidez</b>                  | Mistura homogênea e coesa          | Segregação ou excesso de fluidez                                                      |
| <b>Printabilidade</b>           | Filamento contínuo e uniforme      | Ruturas ou variações da espessura                                                     |
| <b>Capacidade de construção</b> | Camadas bem unidas e estáveis      | Colapso ou deformações significativas da peça impressa                                |
| <b>Extrusão</b>                 | Fluxo constante e sem interrupções | Fluxo irregular e com falhas visíveis de argamassa                                    |
| <b>Exsudação</b>                | Sem excesso de água                | Excesso de água; sinais de humidade excessiva; peça bastante brilhantes pós-impressão |

### 3.5.1. ENSAIO DE ABAIXAMENTO

O ensaio de abaixamento, também conhecido como slump test, foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3:1999 [125] e tem como objetivo avaliar a consistência, fluidez e a capacidade de construção da argamassa em estudo. É fundamental para verificar se a mistura apresenta a trabalhabilidade adequada, de maneira a ser extrudida de forma contínua e homogênea.

O procedimento inicia-se com a introdução da argamassa preparada no cone de ensaio que deve estar centrado no meio da base de metal (Figura 30 a)). Primeiro enche-se o cone até aproximadamente metade da sua altura; de seguida, deixa-se cair 10 vezes o pilão, pela ação da gravidade, para compactar a argamassa. O cone é então preenchido com a argamassa, sendo depois removido verticalmente. O valor do abaixamento é então medido com o auxílio de uma régua (Figura 30 b)), registando-se a diferença em mm entre a altura inicial de 60 mm (altura do cone) e a altura final.

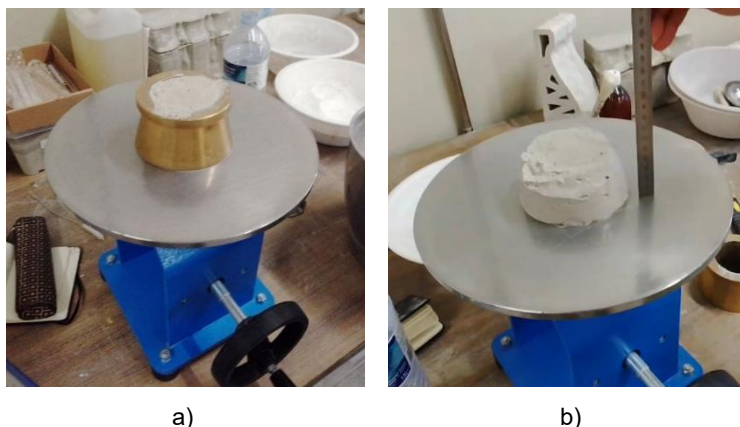


Figura 30 – a) Cone e b) Medição do abaixamento.

### 3.5.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

O ensaio de espalhamento usa-se também para avaliar a trabalhabilidade da argamassa. A norma usada para este ensaio é a mesma que para o ensaio de abaixamento e permite observar a fluidez da argamassa, ou seja, a facilidade com que se espalha sobre a base.

Depois de realizado o ensaio de abaixamento, procedeu-se ao ensaio do espalhamento, onde se rodou o “volante” da mesa quinze vezes. É então medido o diâmetro final da argamassa espalhada em duas direções perpendiculares, calculando-se o valor médio dos 2 valores (Figura 31).



Figura 31 – Ensaio de espalhamento.

### **3.6. TESTES DE IMPRESSÃO**

O processo de impressão segue-se às etapas descritas anteriormente: pesagem dos componentes; mistura das argamassas; ensaios no estado fresco (ensaios de espalhamento e abaixamento). Antes da impressão propriamente dita, é também necessário fazer a calibração da impressora: definir a altura da base da peça (no eixo Z); verificar se a argamassa é extrudível (comando “material extrusion” da impressora); definição da quantidade de material que sai do extrusor; velocidade de impressão. Durante a impressão, sempre que necessário, otimizaram-se estes 2 últimos parâmetros, de forma a evitar falhas de deposição do material.

Na Tabela 12 são apresentados os critérios adotados para avaliação da qualidade das peças impressas no estado endurecido. Estes critérios de natureza qualitativa, foram estabelecidos com base na observação prática e na necessidade de assegurar uma triagem eficiente e objetiva das amostras a ensaiar. Apesar de não estarem formalizados em normas específicas, refletem abordagens semelhantes identificadas na literatura para avaliação visual de elementos produzidos por impressão 3D permitindo uma verificação rápida e eficiente das peças.

Tabela 12 – Avaliação das peças impressas.

| <b>Critério</b>                          | <b>1<br/>(Muito Mau)</b>                  | <b>2<br/>(Mau)</b>                       | <b>3<br/>(Aceitável)</b>                 | <b>4<br/>(Bom)</b>                       | <b>5<br/>(Muito Bom)</b>             | <b>Método de<br/>avaliação</b> |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Acabamento</b>                        | Superfície com falhas e defeitos visíveis | Superfície irregular com falhas pontuais | Superfície funcional com pequenas falhas | Superfície lisa, poucos defeitos visuais | Superfície uniforme e sem defeitos   | Inspeção visual                |
| <b>Dimensões das camadas (Espessura)</b> | <80% ou >200% do diâmetro do bico (8 mm)  | 80–99% ou 171–200% do diâmetro do bico   | 100–110% ou 160–170% do diâmetro do bico | 111–159% do diâmetro do bico             | 120–150% do diâmetro do bico         | Inspeção visual + Paquímetro   |
| <b>Integridade estrutural</b>            | Fissuras, deslocamentos entre camadas     | Algumas fissuras ou desalinhamentos      | Boa ligação entre camadas                | Estrutura estável, sem fissuras visíveis | Estrutura íntegra e totalmente coesa | Inspeção visual                |
| <b>Colapso</b>                           | Peça colapsou totalmente                  | Colapso parcial evidente                 | Estrutura em pé com deformações          | Peça estável com boa geometria           | Nenhum colapso, estabilidade total   | Inspeção visual                |
| <b>Printabilidade</b>                    | Impossível imprimir                       | Impressão com interrupções frequentes    | Impressão com defeitos pontuais          | Impressão fluida e contínua              | Impressão perfeita, sem interrupções | Inspeção visual                |

### 3.7. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios no estado endurecido são fundamentais para avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade das argamassas. No presente estudo, esses ensaios foram apenas realizados às argamassas que apresentam os melhores resultados, avaliando-se a resistência à compressão, à flexão e a absorção de água por capilaridade.

#### 3.7.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi realizado segundo a norma EN 196-1:2016 [126], mas com alguns pequenos ajustes adaptados para I3D e tem como objetivo determinar a resistência mecânica da argamassa endurecida sob esforços de compressão expressa em MPa. Este ensaio é fundamental para avaliar a capacidade do material de suportar cargas estruturais.

Relativamente ao procedimento de ensaio:

- Foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, conforme a norma.
- Inicialmente os provetes são ensaiados a flexão, resultando na obtenção de duas metades, posteriormente utilizadas para o ensaio de resistência à compressão.
- Cada metade é colocada entre as placas de compressão de uma prensa hidráulica, garantindo o alinhamento correto da carga.

- A carga é aplicada de forma gradual e contínua, com uma taxa de carregamento de 500 N/s, até a rotura do provete.
- A resistência à compressão ( $R_c$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Onde:

F = Carga máxima aplicada no momento da rotura (N)

A = Área da superfície

Os resultados obtidos serão comparados com os existentes na literatura para perceber se estão dentro dos valores recomendados.

### 3.7.2. ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio a flexão segue a mesma norma que o ensaio de compressão [122] e também se expressa em MPa. É importante para avaliar a integridade estrutural da argamassa impressa.

Relativamente ao procedimento de ensaio:

- São utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm;
- O ensaio é conduzido numa máquina de ensaio equipada com um sistema de três pontos de apoio;
- A carga é aplicada de forma gradual e contínua até que ocorra a rotura do provete, com uma taxa de carregamento de 20 N/s;
- A resistência à flexão ( $R_f$ ) é determinada pela equação:

$$R_f = \frac{3FL}{2BH^2}$$

Onde:

F = Carga aplicada no momento da rotura (N)

L = Distância entre os apoios (mm)

B = Largura do provete (mm)

H = Altura do provete (mm)

Assim como no ensaio de compressão, o ensaio à flexão foi realizado com uma ligeira adaptação relativamente à taxa de aplicação da carga, uma vez que a norma EN 196-1:2016 define velocidades diferentes das que foram aplicadas. Esta alteração visou manter o procedimento seguido em ensaios anteriores, de modo a permitir comparações entre os resultados obtidos.

### 3.7.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O coeficiente de absorção de água por capilaridade,  $A_w$ , expresso em  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$ , representa a quantidade de água absorvida por um material ao longo do tempo e representa a massa de água absorvida pela área de material em contacto com a água. O ensaio segue a norma Europeia ISO 15148:2002 [127].

O procedimento de ensaio contempla as seguintes etapas:

- São utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 100 mm;
- As faces laterais e superiores dos provetes são impermeabilizadas com resina epóxi, de modo que a absorção se faça pela base do provete apenas na direção vertical;
- Os provetes são acondicionados em ambiente laboratorial a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$ , até atingirem uma massa constante;
- Após essa estabilização, os provetes são colocados com a base submersa em água a uma altura de  $5 \pm 2$  mm;
- A massa de cada provete é registada em diferentes intervalos de tempo (5 minutos, 10 minutos, 20 minutos, 40 minutos, 60 minutos, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas), mantendo sempre o nível de água constante durante os ensaios.

O coeficiente de absorção é determinado pela seguinte equação:

$$A_w = \frac{\Delta m_t}{\sqrt{86400}}$$
$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A}$$

Onde:

$A_w$  – Coeficiente de absorção de água

$\Delta m_t = m_t - m_i$  variação da massa (kg)

$A$  – Área da base do provete em contacto com a água ( $\text{m}^2$ )

$m_i$  – Massa inicial do provete (kg)

$m_t$  – Massa no instante  $t$  (kg)

## 3.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreve o trabalho experimental desenvolvido com o objetivo de formular argamassas a serem impressas na impressora 3D Delta WASP 40100. Tal como referido, o tipo de equipamento de impressão e o sistema de extrusão adotado influenciam significativamente a composição das misturas e o seu desempenho.

No caso de estudo abordado nesta dissertação, o TNSJ, classificado como monumento nacional desde 2012, identificou-se uma degradação acentuada de elementos decorativos das fachadas, como mísulas e cornijas. Estes elementos, originalmente executados em argamassa de cimento e cal armada com malha metálica, têm vindo a deteriorar-se devido à corrosão das armaduras metálicas.

Foram desenvolvidas duas formulações principais: a argamassa A1, com 70% de ligante e 30% de agregado, e a argamassa B1, com 60% de ligante e 40% de agregado. Os materiais utilizados foram cal

hidráulica natural, cimento Portland branco, areia do rio e superplastificante à base de policarboxilato. Foi definido um protocolo padronizado da mistura para garantir uniformidade das argamassas. Explicaram-se em detalhe os procedimentos dos ensaios, tanto no estado fresco (espalhamento e abaixamento) como no estado endurecido (compressão, flexão e absorção de água por capilaridade), de acordo com as respetivas normas.



# 4

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. ENQUADRAMENTO

O capítulo 4 destina-se à análise e discussão dos resultados obtidos após a realização dos trabalhos laboratoriais descritos no capítulo anterior, com o objetivo de avaliar o desempenho das diferentes formulações desenvolvidas e a sua viabilidade para aplicação simultânea em I3D e na reabilitação do património. A análise contempla o comportamento das argamassas no estado fresco e endurecido assim como as propriedades das argamassas.

Pretendeu-se avaliar a influência das variáveis em estudo, como a proporção de ligantes, agregados e água, relação água-ligante e ligante-agregado e de que maneira as alterações nas formulações afetam o desempenho das argamassas, desde a fase de extrusão até à sua cura. Parâmetros como a fluidez, a capacidade de construção, a adesão entre camadas e o acabamento foram também avaliados.

Por fim, os resultados são ainda comparados com valores encontrados na literatura existente, de forma a validá-los. Contudo, por se tratar de um estudo pioneiro em relação à aplicação de argamassas à base de cal e cimento, poucos estudos foram encontrados, tecendo-se comparações com estudos ligeiramente distintos.

### 4.2. TESTES DE IMPRESSÃO

O principal objetivo desta etapa é avaliar o desempenho das misturas durante o processo de impressão, que para ser bem-sucedida depende de um equilíbrio de várias propriedades das argamassas.

O modelo 3D utilizado para imprimir as composições desenvolvidas tinha 20 camadas com 2.50 mm de altura (à exceção da primeira, que tinha 3 mm), resultando numa altura total de 50.5 mm. O tempo de impressão de cada peça foi de cerca de 5 minutos. Este modelo revelou-se suficiente para avaliar as propriedades de impressão consideradas e pode ser observado na Figura 33.

Na Tabela 13 e Figura 32 são apresentados os resultados experimentais obtidos para a argamassa A1. Para além das dosagens de cada constituinte, calculou-se a relação  $a/l$  e  $agr/l$ , que são essenciais para controlar as propriedades no estado fresco e prever a quantidade de água a usar nas misturas. As peças impressas encontram-se apresentadas na Figura 33. A observação visual das peças permitiu aferir a qualidade do acabamento, a definição das camadas e a presença (ou ausência) de deformações, falhas de extrusão e colapsos, parâmetros que serão também discutidos ao longo desta secção.

Tabela 13 – Composição das argamassas com 70% ligante + 30% agregados.

| Ligantes                    | Ref. | Cim.<br>(g) | Cal<br>(g) | Areia<br>(g) | Água<br>(g) | a/l   | agr/l |
|-----------------------------|------|-------------|------------|--------------|-------------|-------|-------|
| 50% de cimento +<br>50% cal | 1.1  | 350         | 350        | 300          | 280         | 0.400 | 0.429 |
|                             | 1.2  | 350         | 350        |              | 285         | 0.407 |       |
| 60% de cimento +<br>40% cal | 2.1  | 420         | 280        |              | 260         | 0.371 |       |
|                             | 2.2  | 420         | 280        |              | 265         | 0.379 |       |
|                             | 2.3  | 420         | 280        |              | 270         | 0.386 |       |
| 75% de cimento +<br>25% cal | 3.1  | 525         | 175        |              | 260         | 0.371 |       |

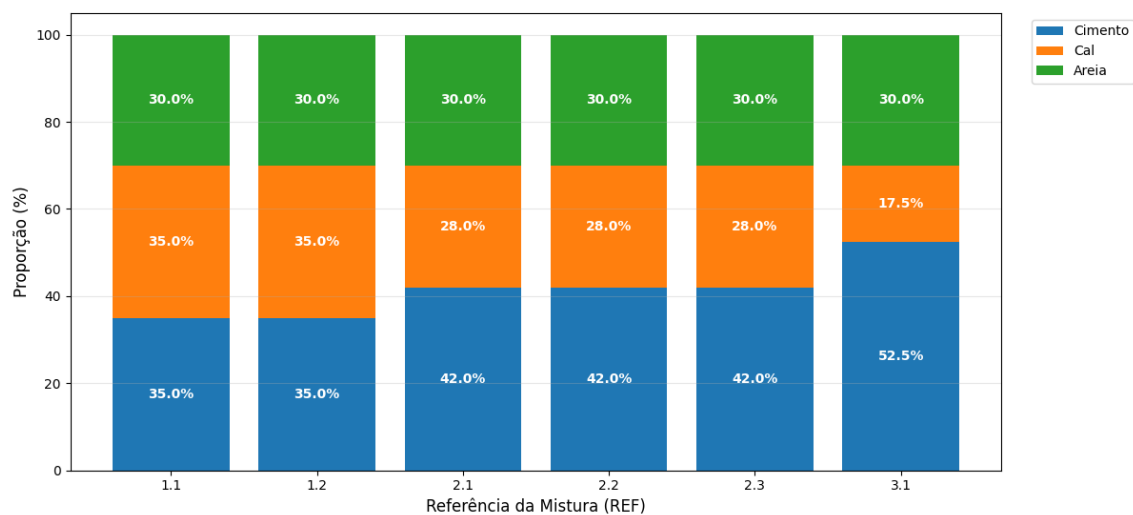


Figura 32 – Composições com 70% de ligante e 30% agregado.

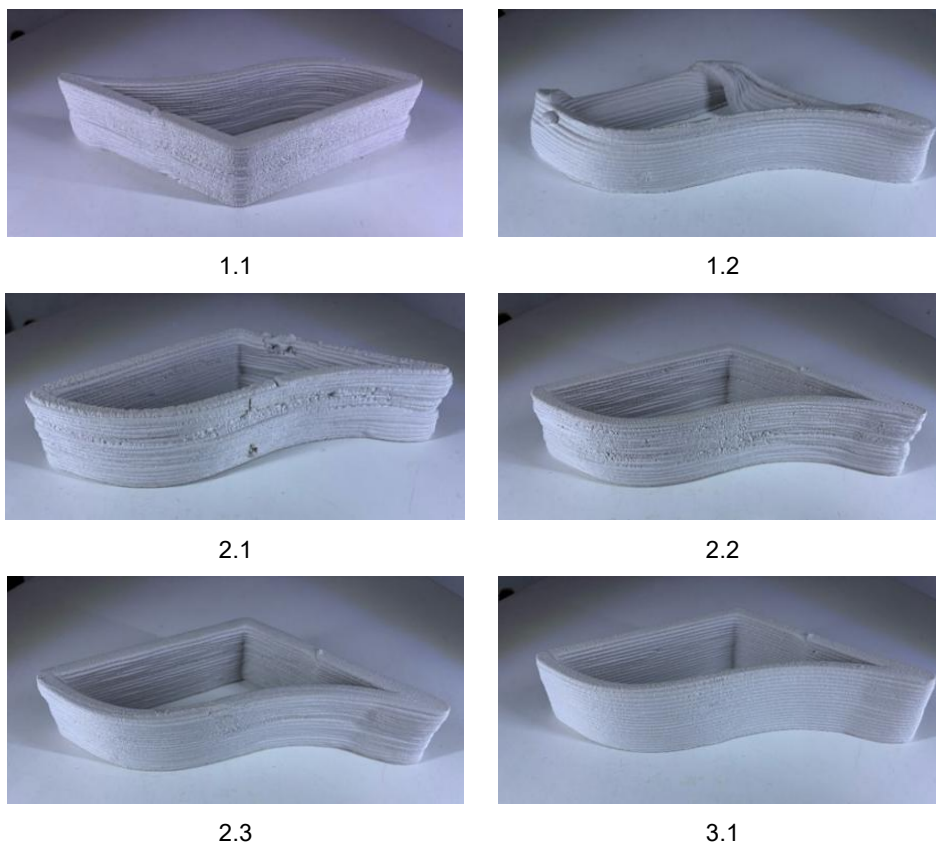


Figura 33 – Peças impressas com 70% de ligante e 30% de agregado.

Todas as peças foram impressas com o mesmo fator de extrusão inicial de 100%, que foi sendo ajustado consoante as necessidades de cada mistura. O valor do rácio de a/l manteve-se dentro dos valores encontrados na literatura para argamassas sem qualquer uso de aditivos, nomeadamente SP de 0,35 – 0,40 [128]. Outro fator importante reside na granulometria dos materiais utilizados: partículas finas como o cimento aumentam significativamente a necessidade de água devido à sua elevada área superficial, de forma a manter a trabalhabilidade da mistura [129]. Com a adição de SP, a trabalhabilidade da mistura aumenta [130], alternando o rácio a/l para valores perto de 0.30 [131]. É importante notar também que pequenas variações na quantidade de água podem ter impactos significativos nas propriedades e na forma das peças.

O valor do rácio agr/l foi sempre o mesmo. Este valor influencia a resistência das argamassas assim como a qualidade final da peça impressa, uma vez que uma maior proporção de agregados pode comprometer o acabamento da peça, que acaba por ser mais rugoso. Contrariamente, o uso de mais ligante permite uma maior capacidade de construção.

Relativamente aos valores dos ensaios no estado fresco, quanto mais pequenos forem os valores de abaixamento, melhor a capacidade de construção; contrariamente, se forem muito elevados podem causar deformações ou perda da estabilidade estrutural [132]. Por norma, quanto maior o valor do ensaio de espalhamento, maior a fluidez; contudo, se esse valor for excessivo, a estrutura vai colapsar. De acordo com a literatura, valores adequados para argamassas de I3D situam-se entre 180 mm e 240 mm [133].

Das 7 misturas realizadas, 2 delas (2.3 e 3.1) tiveram um excelente resultado final estando de acordo com os 5 critérios estabelecidos previamente como demonstrado na Tabela 14. De notar também que o

coeficiente de a/l de ambas é muito similar. Pelos resultados obtidos podemos observar que quanto maior a percentagem de cal em relação à percentagem de cimento, mais água será necessária para extrudir.

Na Tabela 14 é apresentada uma análise dos resultados individuais do comportamento de cada argamassa desenvolvida. Foram estabelecidos critérios de avaliação e foi feita a média atribuindo assim uma nota final de 1 a 5.

Tabela 14 – Avaliação das peças impressas com 70% de ligante e 30% de agregado.

| Ref. | A | DC  | IE  | C   | P | Análise de Resultados                                                                                           | AF [1-5] |
|------|---|-----|-----|-----|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1.1  | 3 | 3   | 3   | 3   | 3 | Resultado aceitável; algumas deformações; camadas não estão todas uniformes; exsudação                          | 3        |
| 1.2  | 2 | 3   | 2   | 1   | 3 | Camadas uniformes; falta de capacidade de construção; colapso por excesso de água                               | 2.2      |
| 2.1  | 1 | 2   | 3   | 2   | 2 | Pouco extrudível; muitas falhas de argamassa visíveis a olho nu                                                 | 2.0      |
| 2.2  | 3 | 3.5 | 3.5 | 3   | 3 | Ainda com falhas e imperfeições relativamente à 2.1                                                             | 3.2      |
| 2.3  | 4 | 4   | 4.5 | 4.5 | 4 | <b>Camadas uniformes e quase sem deformações; quase perfeita</b>                                                | 4.2      |
| 3.1  | 5 | 5   | 5   | 5   | 5 | <b>Perfeita; as camadas estão uniformes; boa capacidade de construção; sem deformações; sem excesso de água</b> | 5        |

A – Acabamento; DC – Dimensão das camadas; IE – Integridade estrutural;  
C – Colapso; P – Printabilidade; AF – Avaliação final

Na Tabela 15 e Figura 34 são apresentados os resultados experimentais obtidos para a argamassa B1. Para além das dosagens de cada constituinte, calculou-se a relação a/l e agr/l, essenciais para controlar as propriedades no estado fresco e prever a quantidade de água a usar nas misturas. As peças impressas encontram-se apresentadas na Figura 35.

Tabela 15 – Composição das argamassas 60% de ligante e 40% de agregado.

| Ligantes                        | Ref. | Cim. (g) | Cal (g) | Areia (g) | Água (g) | a/l   | agr/l |
|---------------------------------|------|----------|---------|-----------|----------|-------|-------|
| <b>50% de cimento + 50% cal</b> | 4.1  | 300      | 300     | 400       | 260      | 0.433 | 0.667 |
|                                 | 4.2  | 300      | 300     |           | 250      | 0.417 |       |
| <b>60% de cimento + 40% cal</b> | 5.1  | 360      | 240     |           | 250      | 0.417 |       |
|                                 | 5.2  | 360      | 240     |           | 240      | 0.400 |       |
| <b>75% de cimento + 25% cal</b> | 6.1  | 450      | 150     |           | 250      | 0.417 |       |
|                                 | 6.2  | 450      | 150     |           | 240      | 0.400 |       |
|                                 | 6.3  | 450      | 150     |           | 230      | 0.383 |       |

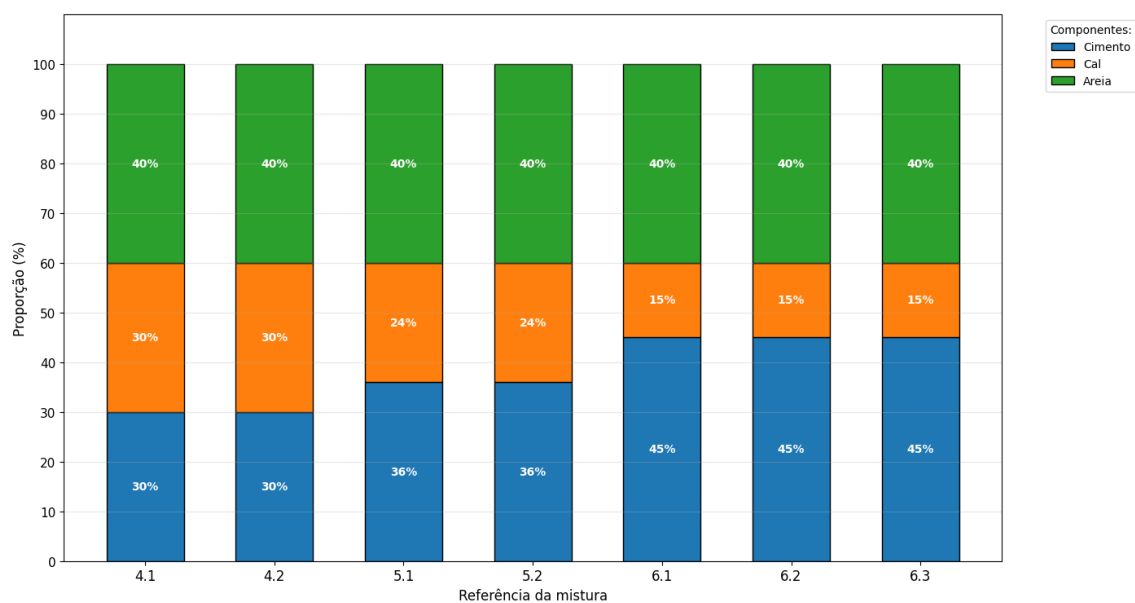
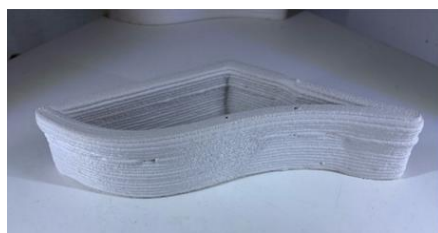
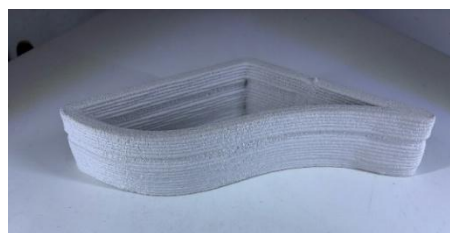


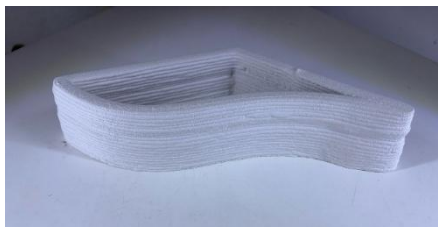
Figura 34 – Composições com 60% de ligante e 40% agregado.



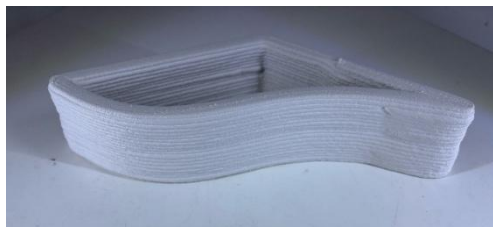
4.1



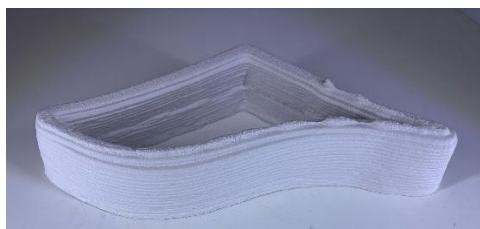
4.2



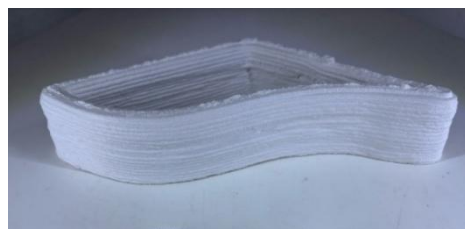
5.1



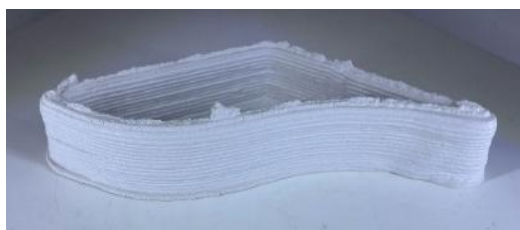
5.2



6.1



6.2



6.3

Figura 35 – Peças impressas com 60% de ligante e 40% de agregado.

A diferença para a primeira ronda de ensaios está na alteração da quantidade de ligante. Com esta alteração, a quantidade ótima de água diminuiu, como visto anteriormente.

Concluimos com este estudo que as argamassas A1 apresentam mais qualidade do que as B1, como se observou no estudo de Malla et al. que refere que um aumento da quantidade de agregado proporciona uma melhoria da capacidade de construção, mas pode reduzir a extrudabilidade e a qualidade da impressão [134]. O aumento da quantidade de agregado também acarreta um aumento de pressão necessária para o bombeamento, caso haja bomba [129].

Nos ensaios realizados, observou-se que as argamassas com melhor acabamento, tanto na primeira ronda de ensaios como na segunda, foram as que tiveram uma maior proporção de cimento em relação à cal. Esse comportamento pode ser devido às diferentes propriedades dos materiais. O cimento, que apresenta partículas mais finas do que a cal, acaba por proporcionar uma argamassa com melhor coesão e com menos poros, o que resulta em peças com maior definição e uniformidade das camadas [135]. A maior quantidade de cimento também permite um ganho de resistência mais precoce, o que favorece a capacidade de construção, fator essencial para garantir a qualidade da impressão. A cal, por sua vez,

permite melhorar a trabalhabilidade, mas reduz a rigidez inicial da argamassa, com uma maior tendência para deformações e colapsos pós extrusão, como aconteceu com a peça 1.2.

Na Tabela 16 é novamente apresentada a análise dos resultados individuais do comportamento de cada argamassa desenvolvida. Foram estabelecidos critérios de avaliação e foi feita a média atribuindo assim uma nota final de 1 a 5.

Tabela 16 – Avaliação das peças impressas – 60% ligante e 40% agregado.

| Ref. | A   | DC  | IE  | C   | P   | Análise de Resultados                                      | AF [1-5] |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------|----------|
| 4.1  | 3   | 3   | 3.5 | 3.5 | 3.5 | Ok; exsudação e algumas deformações visíveis               | 3.3      |
| 4.2  | 4   | 3   | 3   | 4   | 4   | Bom acabamento final                                       | 3.6      |
| 5.1  | 3   | 4   | 4   | 4   | 4   | Camadas uniformes; boa printabilidade; algumas deformações | 3.8      |
| 5.2  | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | <b>Camadas uniformes; bom acabamento</b>                   | 4.5      |
| 6.1  | 3   | 2   | 3   | 3   | 3   | Boa printabilidade; exsudação                              | 2.8      |
| 6.2  | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | Algumas imperfeições e deformações                         | 3        |
| 6.3  | 3.5 | 4   | 4   | 4   | 3.5 | <b>Bom acabamento; boa printabilidade; boa fluidez</b>     | 3.8      |

A – Acabamento; DC – Dimensão das camadas; IE – Integridade estrutural;

C – Colapso; P – Printabilidade; AF – Avaliação final

Após a caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, as formulações com melhor desempenho foram selecionadas para a fase seguinte: testes de impressão com a incorporação de SP (Tabela 17 e Figura 36). A colocação do SP nas argamassas tem como principal objetivo melhorar a trabalhabilidade e a fluidez sem aumentar a relação a/l. Foram avaliadas as mesmas propriedades previamente mencionadas (printabilidade, extrudabilidade, capacidade de construção, adesão entre camadas e tempo de abertura de uma maneira indireta).

O SP usado manteve uma relação de 0.5% em relação à quantidade de ligante das misturas. As argamassas escolhidas foram a 2.3, a 3.1, a 5.2 e a 6.3. Estas formulações foram alvo de várias sessões laboratoriais experimentais, com o objetivo de ajustar diferentes parâmetros e melhorar o seu desempenho em termos de extrudabilidade, estabilidade e resistência mecânica.

Tabela 17 – Composição das argamassas com SP.

| Composição                             | Ligantes                       | Ref. | Cim.<br>(g) | Cal<br>(g) | Areia<br>(g) | Água<br>(g) | SP<br>(g) | a/l   | agr/l |
|----------------------------------------|--------------------------------|------|-------------|------------|--------------|-------------|-----------|-------|-------|
| <b>70% ligante +<br/>30% agregados</b> | 60% de<br>cimento +<br>40% cal | 2.3  | 420         | 280        | 300          | 210         | 3.50      | 0.300 | 0.429 |
|                                        |                                | 2.3  | 420         | 280        |              | 220         |           | 0.314 |       |
|                                        | 75% de<br>cimento +<br>25% cal | 3.1  | 525         | 175        |              | 225         |           | 0.321 |       |
|                                        |                                | 3.1  | 525         | 175        |              | 220         |           | 0.314 |       |
|                                        |                                | 3.1  | 525         | 175        |              | 215         |           | 0.307 |       |
|                                        |                                | 3.1  | 525         | 175        |              | 205         |           | 0.293 |       |
|                                        |                                |      |             |            |              |             |           |       |       |
| <b>60% ligante +<br/>40% agregados</b> | 60% de<br>cimento +<br>40% cal | 5.2  | 360         | 240        | 400          | 180         | 3         | 0.300 | 0.667 |
|                                        |                                | 5.2  | 360         | 240        |              | 200         |           | 0.333 |       |
|                                        |                                | 5.2  | 360         | 240        |              | 205         |           | 0.342 |       |
|                                        |                                | 5.2  | 360         | 240        |              | 204         |           | 0.340 |       |
|                                        |                                | 5.2  | 360         | 240        |              | 202.50      |           | 0.338 |       |
|                                        | 75% de<br>cimento +<br>25% cal | 6.3  | 450         | 150        |              | 180         |           | 0.300 |       |
|                                        |                                | 6.3  | 450         | 150        |              | 185         |           | 0.308 |       |
|                                        |                                | 6.3  | 450         | 150        |              | 187.50      |           | 0.313 |       |
|                                        |                                | 6.3  | 450         | 150        |              | 195         |           | 0.325 |       |
|                                        |                                | 6.3  | 450         | 150        |              | 192.50      |           | 0.321 |       |
|                                        |                                | 6.3  | 450         | 150        |              | 190         |           | 0.317 |       |
|                                        |                                |      |             |            |              |             |           |       |       |
|                                        |                                |      |             |            |              |             |           |       |       |



2.3 com SP



3.1 com SP



3.1



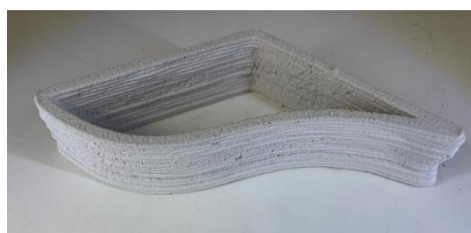
5.2 (205 g)



5.2 (200 g)



5.2 (204 g)



5.2 (202.5 g)



6.3 (192.5 g)



6.3 (187.5 g)



6.3 (185 g)



6.3 (190 g)

Figura 36 – Peças impressas com SP.

Embora a utilização de SP permita uma redução significativa da quantidade de água nas misturas, este estudo evidenciou que há também algumas desvantagens associadas ao seu uso. As argamassas com SP apresentaram uma perda mais rápida de trabalhabilidade, conhecida também como redução do tempo de abertura. Esse efeito pode comprometer o desempenho durante a impressão, provocando interrupções e atrasos no processo, levando ao entupimento do extrusor e falhas de adesão entre camadas. Foram efetuadas também algumas tentativas de otimização da argamassa 1.1 (com 225, 230 e 250 ml de água), mas após várias tentativas sem resultados promissores, concluiu-se que argamassas com mais cal (1.1;1.2 e a 4.1;4.2) foram descartadas, não se procedendo à sua otimização com SP.

Este comportamento de redução do tempo de abertura pode estar diretamente relacionado com a menor relação a/l das misturas com SP, que se tornam menos maleáveis ao longo do tempo. Estudos como os de Zhang et al., que associa a redução do tempo de abertura à menor relação a/l. Assim, apesar do uso de SP ser vantajoso para a fluidez inicial, a sua aplicação exige cuidados adicionais, nomeadamente o tipo de SP, dosagem e combinação com retardadores, para equilibrar a trabalhabilidade com o tempo de abertura [136].

O rácio a/l das misturas variou entre 0.29 e 0.34, indo de encontro aos valores da literatura. A quantidade de SP foi de 3.5 g nas argamassas com 70% de ligante e 3 g nas argamassas com 60% de ligante.

Adicionalmente, durante a fase de testes, observou-se que algumas formulações, em particular as identificadas como líquidas, apresentaram um comportamento inadequado para I3D. Estas misturas apesar de possuíram muita fluidez, não estavam em condições de ser extrudíveis, sendo então descartadas para os testes de impressão e para os ensaios. É importante manter a fluidez controlada, onde a argamassa deve ser suficientemente fluida para ser moldada e ao mesmo tempo suportar o peso das camadas superiores.

Das argamassas testadas, podemos verificar que a 3.1 apresentou um excelente acabamento final, e também apresentou boas propriedades durante a impressão. De ter em consideração que a maioria dos testes de impressão ocorreram com alterações do fator de extrusão, o que inevitavelmente acaba por provocar camadas diferentes e não homogêneas, mas neste estudo foi tido em conta que era a melhor opção dado algumas interrupções do bico do extrusor.

Foram efetuados vários testes de impressão às 4 argamassas previamente selecionadas. O processo é algo empírico e iterativo até chegar à otimização da mistura, sendo que se obtiveram várias misturas inadequadas. O ponto de partida foi a relação a/l encontrada na literatura que era aproximadamente 0.30. Na Tabela 18 está descrita cada argamassa testada.

Tabela 18 – Avaliação das peças impressas com SP.

| Ref.             | A   | DC  | IE  | C | P   | AR                                                                                                                                                                                              | AF<br>[1-5] |
|------------------|-----|-----|-----|---|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2.3              | 3   | 3   | 4   | 4 | 4   | Argamassa extrudível e sem entupimento; ajuste de flow, observável na espessura das camadas                                                                                                     | 4           |
| 3.1              | 2   | 2   | 3   | 3 | 2   | Dificuldades a extrudir; vários defeitos no acabamento; filamento foi muito fino                                                                                                                | 2           |
| 3.1              | 4   | 4   | 4   | 4 | 5   | Acabamento bastante uniforme e praticamente perfeito; também se observaram algumas diferenças de espessura nas camadas                                                                          | 4.2         |
| 5.2<br>(200 g)   | 2.5 | 3   | 3   | 4 | 3.5 | Camadas algo consistentes e conservação da geometria; acabamento ainda bruto, mas estruturalmente sólida e com boa resistência; indicada para usos funcionais onde a estética não é prioritária | 3.2         |
| 5.2<br>(202.5 g) | 3   | 3.5 | 3   | 4 | 3.5 | Alguma rugosidade; textura constante; camadas uniformes; aumento da fluidez                                                                                                                     | 3.4         |
| 5.2<br>(204 g)   | 1.5 | 2   | 2.5 | 2 | 2   | Mistura bastante inadequada                                                                                                                                                                     | 2           |
| 5.2<br>(205 g)   | 2   | 3   | 3.5 | 4 | 3.5 | Estruturalmente robusta; acabamento pobre, com camadas espessas e bastante irregulares; além de alguma rugosidade na parte superior da peça                                                     | 3.2         |
| 6.3<br>(185 g)   | 2   | 2.5 | 3   | 3 | 3   | Algumas irregularidades; falta de água                                                                                                                                                          | 2.7         |
| 6.3<br>(187.5 g) | 3   | 2   | 3   | 3 | 3   | Acabamento ok apesar de ter entupido no fim; algumas diferenças de espessura das camadas                                                                                                        | 2.8         |
| 6.3<br>(190 g)   | 4   | 4   | 4   | 4 | 4   | Boa argamassa; espessura de camadas uniforme; melhor dentro das argamassas 6.3                                                                                                                  | 4           |
| 6.3<br>(192.5 g) | 3   | 4   | 4   | 4 | 4   | Facilidade na extrusão; flow constante; acabamento ok                                                                                                                                           | 3.8         |

Comparando agora com o gráfico desenvolvido por Teixeira et al. [92] da Figura 17 sobre a composição típica das argamassas para I3D, composta por 53% de agregados, 21% de cimento Portland, 15% de aditivos e 11% de água, podemos observar que as argamassas otimizadas neste estudo apresentam composições diferentes. Na Figura 37 a), a fração de cimento é mais elevada (33%), tal como os teores de cal (22%) e água (21%), enquanto a percentagem de agregados é bastante inferior (24%). A argamassa apresentada na Figura 37 b) segue uma proporção de 60% de ligantes (cimento + cal) e 40% de agregados (areia), configurando uma mistura com maior teor de ligante em comparação à referência de Teixeira et al. [92]. Essa formulação aproxima-se parcialmente dos dados extraídos das imagens fornecidas, onde se observa uma predominância de cimento (31-40%) e cal (16-22%), totalizando entre 47% e 62% de ligantes, enquanto a areia aparece em proporções reduzidas (24-33%). Esta diferença reflete uma abordagem distinta, mais centrada na adaptação dos materiais às exigências específicas da impressão, privilegiando uma matriz mais rica em ligante e água para garantir a extrudabilidade, ao invés de depender tanto da fração de agregados ou da adição elevada de aditivos.

Além disso, nas formulações com SP (Figura 37 c) e d)), observa-se uma redução expressiva da quantidade de água efeito, causado pelo aditivo, mas com foco apenas na fluidez, o que permite melhorar a coesão da mistura sem comprometer a fluidez necessária, mesmo com uma matriz mais densa em cimento e cal. Estas variações evidenciam diferentes estratégias de formulação para alcançar propriedades adequadas à I3D, reforçando a importância de ajustar as composições às características específicas do equipamento e do contexto de aplicação.

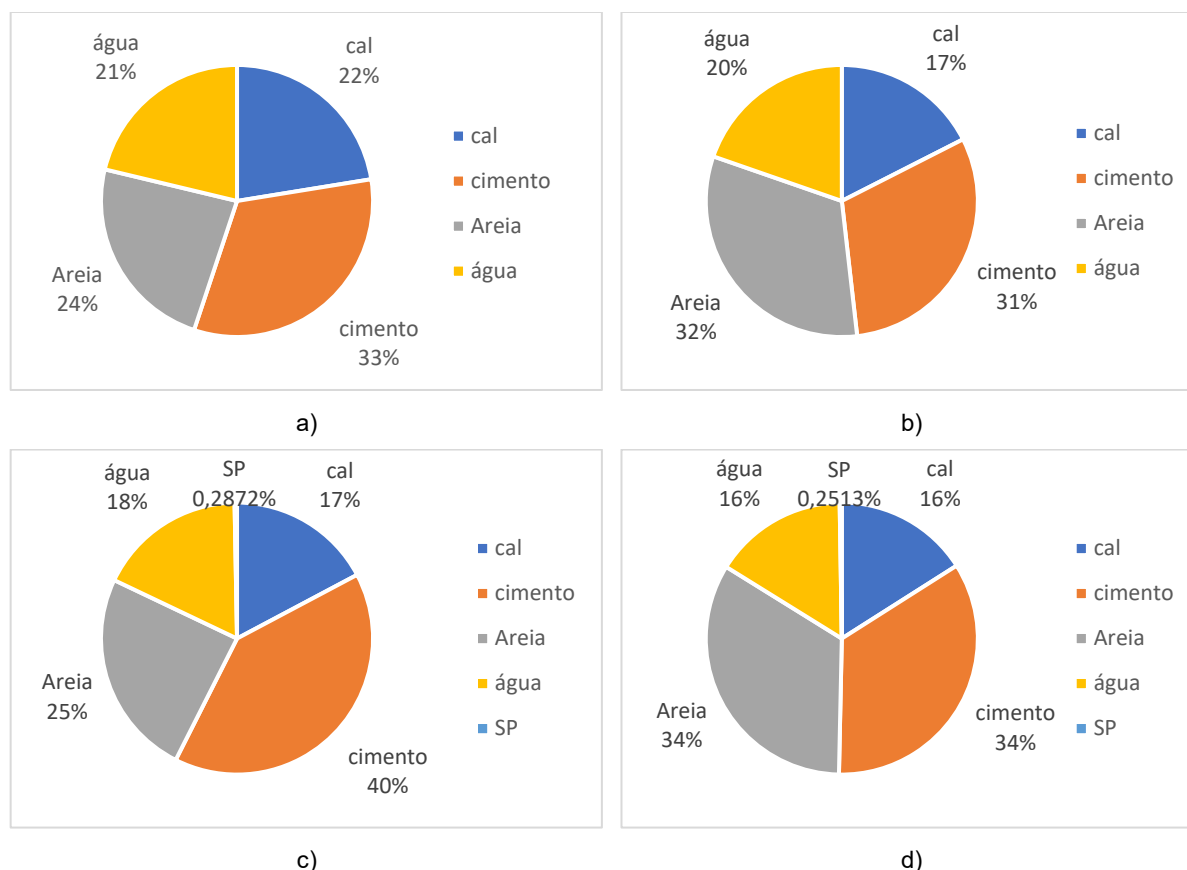


Figura 37 – Composição média de argamassa: a) argamassa com 70% ligante + 30% agregados, b) argamassa com 60% ligante + 40% agregados, c) argamassa com 70% ligante + 30% agregados e SP e d) argamassa com 60% ligante + 40% agregados e SP.

### 4.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

A análise dos ensaios no estado fresco é crucial, sendo o primeiro critério de avaliação de uma argamassa. Para I3D, a argamassa tem de ser extrudida de forma contínua e estável, sem entupimentos ou segregação, além de manter a sua forma após a deposição, de modo a garantir a integridade das camadas subsequentes. Os ensaios de espalhamento e abaixamento foram utilizados para avaliar as argamassas numa fase inicial. Enquanto o espalhamento fornece uma indicação sobre a trabalhabilidade e fluidez, o abaixamento permite observar a capacidade de construção da mistura.

Na Tabela 19 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco em todas as misturas desenvolvidas. Optou-se por realizar os testes apenas nas argamassas devidamente otimizadas.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios no estado fresco: espalhamento e abaixamento.

| Sem SP |                         |                  | Com SP |                         |                  |
|--------|-------------------------|------------------|--------|-------------------------|------------------|
| Ref.   | Espalhamento médio (mm) | Abaixamento (mm) | Ref.   | Espalhamento médio (mm) | Abaixamento (mm) |
| 1.1    | 206.00                  | 16               | –      | –                       | –                |
| 1.2    | 207.00                  | 13               | –      | –                       | –                |
| 2.3    | 207.00                  | 13               | 2.3    | 201.00                  | 13               |
| 3.1    | 205.00                  | 10               | 3.1    | 201.00                  | 15               |
| 4.1    | 207.00                  | 11               | –      | –                       | –                |
| 4.2    | 207.00                  | 10               | –      | –                       | –                |
| 5.1    | 220.00                  | 15               | –      | –                       | –                |
| 5.2    | 212.50                  | 14               | 5.2    | 216.00                  | 15               |
| 6.1    | 212.50                  | 15               | –      | –                       | –                |
| 6.2    | 216.50                  | 15               | –      | –                       | –                |
| 6.3    | 218.00                  | 13               | 6.3    | 220.00                  | 19               |

A partir da Tabela 19 pode-se observar que os valores do espalhamento das argamassas sem SP variaram entre 205 mm e 220 mm, o que está de acordo com os valores encontrados na literatura para este tipo de argamassas. Segundo Ma et al. [137], valores entre 174 mm e 210 mm são adequados para garantir uma boa extrudabilidade e capacidade de construção em argamassa para I3D. Já Tay et al. [138] refere que argamassas com valores no ensaio de espalhamento entre 150 mm e 190 mm têm um acabamento superficial melhor e uma boa capacidade de construção.

Em relação aos resultados dos ensaios de abaixamento, os valores oscilaram entre 10 mm e 16 mm, também dentro de valores adequados, sugere que as misturas apresentam retenção de forma satisfatória, o que é positivo do ponto de vista da capacidade de construção. As misturas com menor valor de abaixamento, no caso a 3.1 e 4.2, apresentam uma maior coesão e resistência.

Contudo, argamassas com constituintes diferentes terão comportamentos reológicos distintos, o que justifica algumas variações em relação aos valores encontrados na literatura. A composição do ligante, nomeadamente a percentagem de cimento em relação à cal, o tipo de granulometria dos agregados, assim como a relação de a/l influenciam diretamente a fluidez das misturas: quanto maior, maior será o valor do slump e do slump flow, o que significa maior fluidez e menor coesão. Na Figura 38 são apresentados dois gráficos de modo avaliar os diferentes parâmetros que influenciam os resultados e podemos observar que algumas argamassas com relação de a/l semelhante apresentam comportamentos distintos.

A argamassa 5.1 com uma relação a/l de 0.417 apresentou o maior valor de espalhamento (220), o que significa que tem uma elevada fluidez. No entanto, a mistura 6.3, com uma relação a/l inferior de 0.383 apresentou um valor elevado de espalhamento (218), o que pode ser atribuído à sua maior proporção de cimento.

No gráfico do abaixamento, observa-se uma tendência de misturas com maior relação água/ligante apresentarem maiores valores de abaixamento, como no caso da mistura 1.1, que demonstrou sinais de excesso de água e baixa capacidade de construção. Em contrapartida, a argamassa 3.1, com uma relação a/l de 0.371, obteve um valor de abaixamento de 10 mm, apresentando excelente coesão após a impressão.

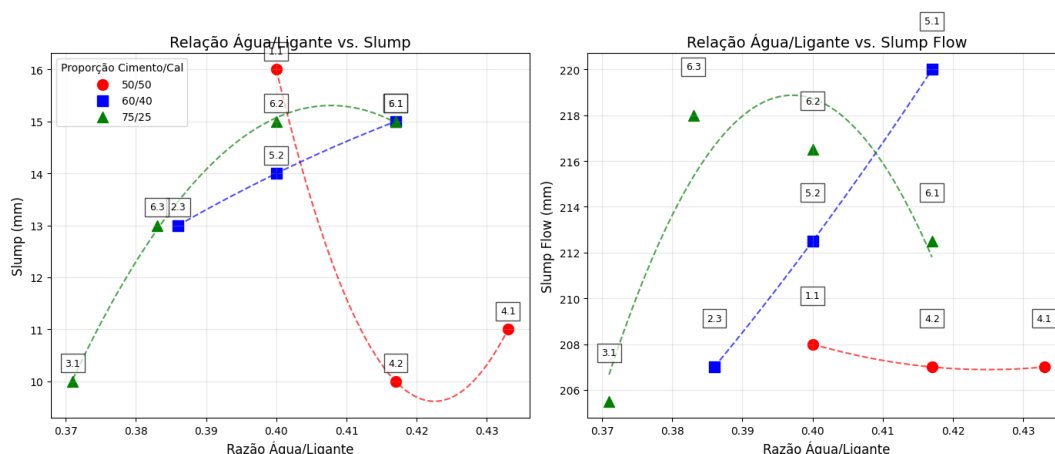


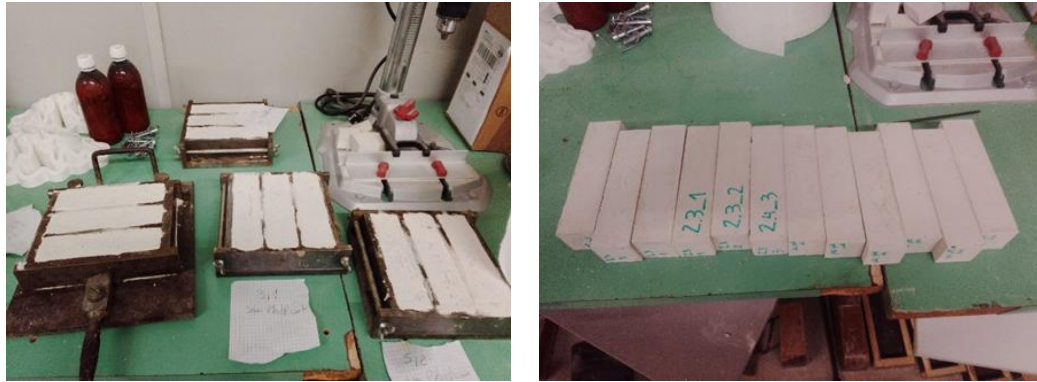
Figura 38 – a) Gráfico da relação entre abaixamento e a/l; b) Gráfico da relação espalhamento e a/l.

As quatro argamassas com melhor comportamento geral (2.3; 3.1; 5.2; 6.3) apresentam valores de espalhamento e abaixamento ligeiramente superiores aos indicados por alguns autores, o que pode ser justificado pelas diferentes composições de ligantes e agregados. As argamassas 5.2 e 6.3 que contêm maior quantidade de agregado apresentaram valores maiores de espalhamento.

#### 4.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.4.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

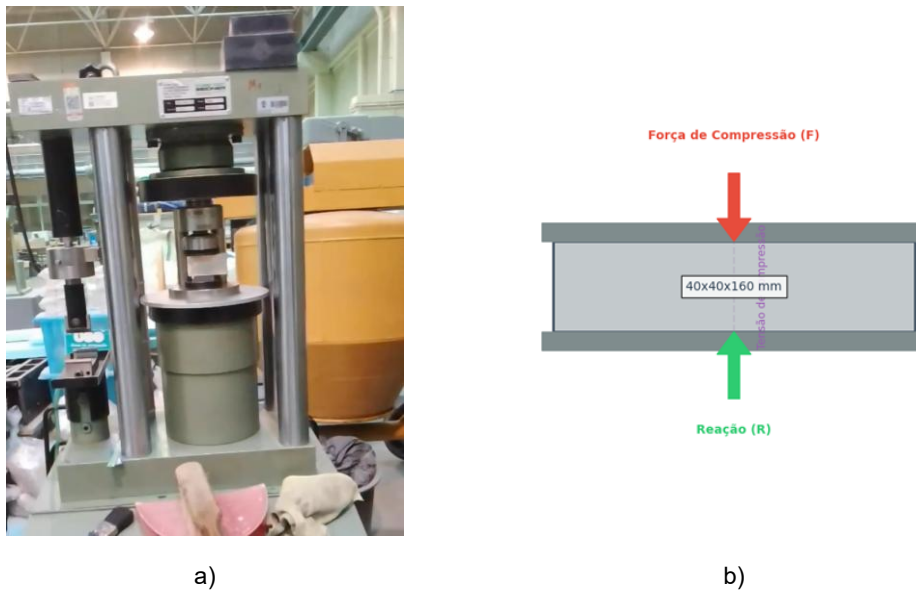
Os provetes utilizados nos ensaios laboratoriais foram preparados em conformidade com a norma EN 196-1, os provetes prismáticos para os ensaios de flexão e compressão foram moldados com dimensões de 40x40x160 mm, utilizando moldes metálicos (Figura 39 a)). Já para o ensaio de absorção de água por capilaridade os provetes foram inicialmente moldados com as mesmas dimensões, e depois do período de cura, foram cortados com dimensões de 40x40x100 mm, tal como especificado para este ensaio, foram preparados 3 provetes para cada ensaio de cada amostra selecionada. A argamassa foi misturada seguindo o mesmo procedimento previamente adotado para a impressão das peças, o procedimento está descrito na secção 3.4. A compactação foi efetuada com recurso a mesa de vibração durante 15 á 20 segundos, reduzindo assim o ar nos provetes e garantindo o correto preenchimento e homogeneização dos moldes, após a compactação foi colocado o papel filtro nos moldes. Os provetes permanecem nos moldes durante um período de 24 horas, no fim do qual são desmoldados e colocados na câmara de cura á uma temperatura controlada, até atingirem a idade prevista para a realização dos respetivos ensaios (Figura 39 b)).



a)  
b)  
Figura 39 – a) Moldagem dos provetes e b) Provetes finais.

#### 4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para poder avaliar a resistência mecânica das argamassas, os provetes foram submetidos a ensaios de compressão. A norma seguida encontra-se descrita na secção 3.7.1 e os resultados obtidos apresentados na Tabela 20. Na Figura 40 a) pode-se observar a prensa para a realização do ensaio e um dos provetes em estudo, assim como na Figura 40 b) podemos ver como se processa o ensaio e as forças que atuam sobre o provete. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais com o auxílio da engenheira Patrícia.



a)  
b)  
Figura 40 – a) Provete ensaiado à compressão e b) Esquema representativo do ensaio à compressão.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compressão.

| Ref. | Provete | Resistência à compressão $R_c$ (MPa) |       | Resistência à compressão média $R_m$ (MPa) + desvio padrão | Ref.      | Provete | Resistência à compressão $R_c$ (MPa) |      | Resistência à compressão média $R_m$ (MPa) + desvio padrão |
|------|---------|--------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|-----------|---------|--------------------------------------|------|------------------------------------------------------------|
| 2.3  | 1       | 52.8                                 | 52.1  | $50.7 \pm 1.99$                                            | 2.3 c/ SP | 1       | 60.4                                 | 60.3 | $61.8 \pm 2.38$                                            |
|      | 2       | 50.4                                 | 51.9  |                                                            |           | 2       | 61.3                                 | 59.7 |                                                            |
|      | 3       | 48.1                                 | 49.00 |                                                            |           | 3       | 65.3                                 | 63.8 |                                                            |
| 3.1  | 1       | 67.5                                 | 64.4  | $64.2 \pm 1.63$                                            | 3.1 c/ SP | 1       | 73.6                                 | 75.7 | $74.0 \pm 0.64$                                            |
|      | 2       | 62.3                                 | 65.4  |                                                            |           | 2       | 69.8                                 | 77.0 |                                                            |
|      | 3       | 64.1                                 | 61.4  |                                                            |           | 3       | 70.2                                 | 77.4 |                                                            |
| 5.2  | 1       | 50.1                                 | 50.6  | $48.9 \pm 1.24$                                            | 5.2 c/ SP | 1       | 53.3                                 | 51.9 | $52.7 \pm 0.98$                                            |
|      | 2       | 48.8                                 | 47.6  |                                                            |           | 2       | 51.6                                 | 52.0 |                                                            |
|      | 3       | 47.3                                 | 49.1  |                                                            |           | 3       | 53.8                                 | 53.7 |                                                            |
| 6.3  | 1       | 63.6                                 | 63    | $62.2 \pm 1.44$                                            | 6.3 c/ SP | 1       | 65.9                                 | 63.6 | $64.9 \pm 1.11$                                            |
|      | 2       | 60.5                                 | 60.7  |                                                            |           | 2       | 65.4                                 | 66.7 |                                                            |
|      | 3       | 62.3                                 | 63.3  |                                                            |           | 3       | 62.8                                 | 64.9 |                                                            |

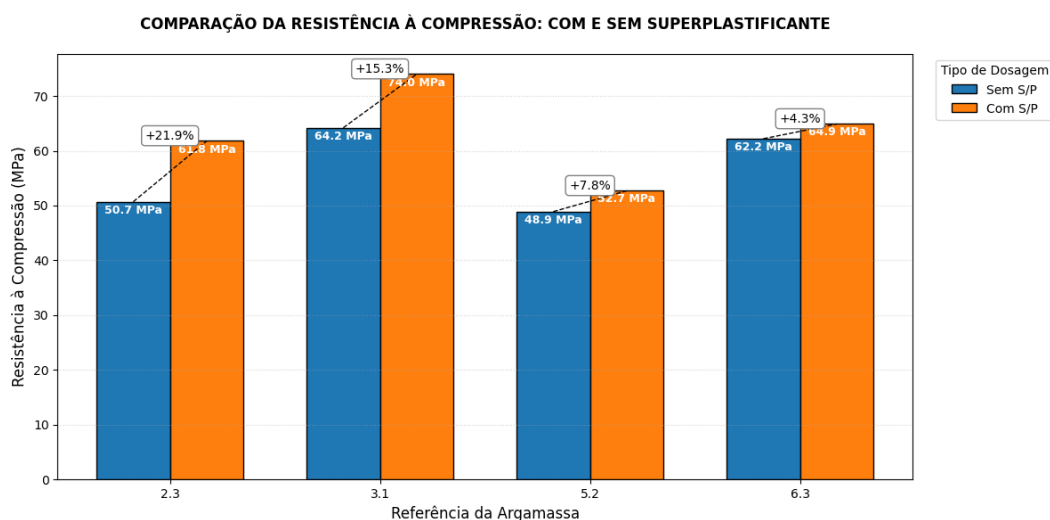


Figura 41 – Comparação dos valores do ensaio de resistência à compressão com e sem SP.

Foram apenas submetidas aos ensaios as argamassas que apresentaram o melhor desempenho no estado fresco e nos testes de impressão. Os resultados obtidos evidenciam que quanto maior a proporção de cimento, maior é a resistência à compressão, sendo os valores mais elevados nas amostras 3.1 e 6.3, que apresentam 75% de cimento e 25% de cal, atingindo resistências de 64.2 MPa e 62.2 MPa, respetivamente, valores elevados mesmo comparados com formulações desenvolvidas para I3D. Por outro lado, as amostras 2.3 e 5.2, com 60% de cimento e 40% de cal, apresentam resistências inferiores como seria de esperar, com valores de 50.7 MPa e 48.9 MPa.

Na literatura, resistência à compressão é normalmente calculada aos 28 dias, enquanto no presente estudo é avaliada aos 7 dias. Comparando estes valores com os valores encontrados na literatura, verifica-se que Zagaroli et al. [139] estudou a composição de duas argamassas tradicionais com

composição de 1:1:6 e 1:2:9 (cimento, cal hidráulica, areia) obtendo valores de 7.91 e 4.16 MPa para provetes moldados ensaiados aos 28 dias [131], valores bastante inferiores aos obtidos. Contudo, é importante considerar que as argamassas para I3D exigem uma resistência inicial elevada uma vez que a deposição sucessiva de camadas depende da estabilidade imediata da mistura. Já argamassas desenvolvidas para I3D, como as reforçadas com fibras de carbono, de Li et al. [140], podem atingir 48 a 52 MPa aos 7 dias tratando-se de provetes moldados [132], enquanto se forem provetes impressos, apresentam resistências inferiores devido à ausência de compactação e à relação entre camadas nos provetes impressos [141].

A partir da análise do gráfico da Figura 41 pode-se constatar que todas as argamassas que contêm SP apresentaram valores de resistência à compressão superiores relativamente as sem aditivos, validando a eficácia do SP na melhoria do desempenho mecânico das argamassas. Este comportamento já seria de esperar dado que têm um menor teor de água e consequentemente menor porosidade e maior compactação [142].

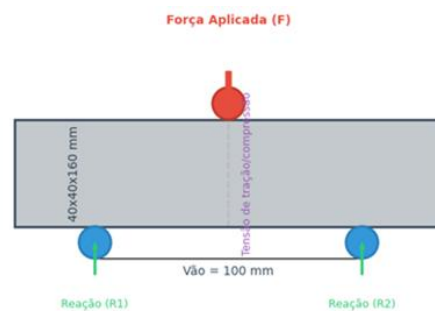
Por fim, importa destacar que mesmo as misturas com mais agregado (5.2 e 6.3) apresentam valores de resistência à compressão elevados, compatíveis com outros valores encontrados na literatura, assegurando estabilidade estrutural.

#### 4.4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A resistência à flexão é uma propriedade importante para caracterizar mecanicamente as argamassas desenvolvidas, sobretudo em casos onde o material pode estar sujeito a esforços transversais. Na Tabela 21 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados segundo a norma descrita na secção 3.7.2, sendo que na Figura 42 a) podemos observar a realização do ensaio e na Figura 42 b) é possível observar em que consiste o ensaio e que forças são aplicadas sobre o provete.



a)



b)

Figura 42 – a) Proвете ensaiado à flexão e b) Esquema representativo do ensaio à flexão.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios à flexão.

| Ref. | Provete | Resistência à flexão, $R_f$ (MPa) | Resistência à flexão média, $R_m$ (MPa) + desvio padrão | Ref.      | Provete | Resistência à flexão, $R_f$ (MPa) | Resistência à flexão média, $R_m$ (MPa) + desvio padrão |
|------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 2.3  | 1       | 6.8                               | $6.5 \pm 0.98$                                          | 2.3 c/ SP | 1       | 7.0                               | $7.4 \pm 0.57$                                          |
|      | 2       | 7.3                               |                                                         |           | 2       | 8.2                               |                                                         |
|      | 3       | 5.4                               |                                                         |           | 3       | 7.0                               |                                                         |
| 3.1  | 1       | 7.5                               | $7.1 \pm 0.36$                                          | 3.1 c/ SP | 1       | 8.4                               | $8.4 \pm 0.37$                                          |
|      | 2       | 6.8                               |                                                         |           | 2       | 8.0                               |                                                         |
|      | 3       | 7.0                               |                                                         |           | 3       | 8.9                               |                                                         |
| 5.2  | 1       | 6.1                               | $6.4 \pm 0.36$                                          | 5.2 c/ SP | 1       | 6.1                               | $6.4 \pm 0.24$                                          |
|      | 2       | 6.8                               |                                                         |           | 2       | 6.6                               |                                                         |
|      | 3       | 6.3                               |                                                         |           | 3       | 6.6                               |                                                         |
| 6.3  | 1       | 6.8                               | $7.4 \pm 0.52$                                          | 6.3 c/ SP | 1       | 7.7                               | $6.9 \pm 0.74$                                          |
|      | 2       | 7.7                               |                                                         |           | 2       | 7.0                               |                                                         |
|      | 3       | 7.7                               |                                                         |           | 3       | 5.9                               |                                                         |

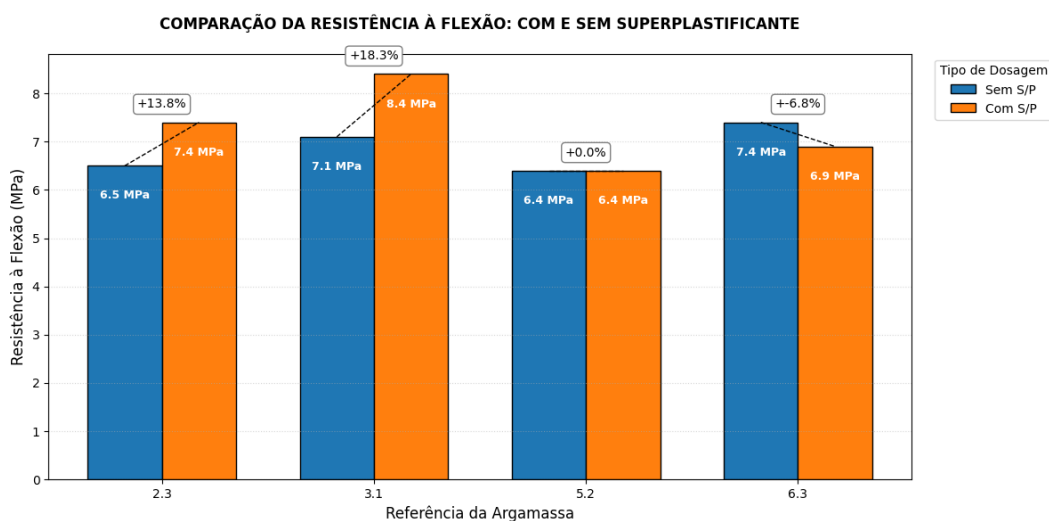


Figura 43 – Comparação dos valores do ensaio de resistência à flexão com e sem SP.

Os resultados apresentados na Tabela 21 evidenciam que as argamassas que apresentam maiores valores de  $R_f$  são também as argamassas que apresentam maior quantidade de cimento (3.1 e 6.3), tal como constatado para os ensaios de compressão. Contudo, ao contrário do que aconteceu nos ensaios de compressão, o aumento do teor de agregado e consequente diminuição do ligante não provocou um aumento do valor da flexão, como se verifica, por exemplo, na argamassa 6.3 em comparação com a 3.1. Comparando estes valores com os encontrados na literatura, o estudo de Zagaroli et al. [139], já mencionado anteriormente, apresentou valores de resistência à flexão de 2.21 MPa numa mistura de cimento, cal hidráulica e areia (1;1;6) e de 1.23 MPa numa mistura com traço 1:2:9, valores relativamente mais baixos, contudo normais, uma vez que se trata de misturas preparadas com base em argamassas tradicionais. Já Li et al. [143] obteve valores entre 6 e 8.30 MPa para argamassas de cimento para I3D reforçadas com fibras.

Observando o gráfico apresentado na Figura 43, pode-se observar que ao contrário do ensaio de compressão, o uso de SP não permitiu aumentar os valores da resistência à flexão de todas as misturas ensaiadas, inclusive verificou-se uma redução na mistura 6.3. Relativamente a essa mistura, o provete 3 apresenta um valor bastante discrepante em relação aos outros dois, o que acaba por baixar significativamente a média, provocando a tal diminuição acentuada que não seria de esperar, já na mistura 5.2 o seu valor não sofreu qualquer alteração. Estes resultados indicam que argamassas com maior teor de agregados acabam por não ser tão otimizadas com a adição do SP. Já as misturas 2.3 e 3.1 apresentaram um ganho de resistência de 13.8% e 18.3% respetivamente em relação as misturas sem aditivos. Podemos concluir assim que a quantidade de agregado da mistura influencia os valores da resistência, sendo quanto menor o seu teor maior o valor da resistência, o mesmo é válido quando analisamos a percentagem de cal e de cimento, misturas com maior teor de cimento tem valores de resistência maiores. Nestes ensaios de flexão, assim como os de compressão, não foi tida em conta a humidade relativa assim como a temperatura, propriedades que têm bastante influência nos resultados obtidos.

#### 4.4.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Para avaliar a durabilidade das argamassas desenvolvidas, os provetes foram submetidos a ensaios de absorção de água por capilaridade conforme descrito em 3.7.3. Os resultados obtidos com o ensaio estão apresentados na Tabela 22. Na literatura, o rácio de a/l tem bastante influência sobre estes resultados: um aumento da quantidade de água na mistura torna a amostra mais permeável, estando a mais exposta a infiltrações de água e sais, o que pode levar a uma degradação mais rápida. Quanto mais baixo for o valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade, mais impermeável será a amostra.

Assim, valores mais baixos do coeficiente de absorção de água por capilaridade são indicativos de melhor compactação, menor porosidade e maior durabilidade da peça, particularmente nas interfaces entre camadas. Assim como nos ensaios de flexão e compressão, foram ensaiados 3 provetes em cada uma das misturas.

Após a moldagem e da desmoldagem, os provetes são submetidos a um processo de impermeabilização com uma mistura epóxi composta por dois constituintes: o Icosit K-101N A e o B. Esta mistura foi preparada com 79% do primeiro (Figura 44 c)) e 21% do segundo (Figura 44 d)). Foram aplicadas duas camadas em cada provete, de forma a garantir uma vedação homogénea (Figura 44 a)).

Em seguida os provetes, foram colocados no tanque de ensaio a uma profundidade de 5 mm em água, valor esse mantido constante e controlado ao longo do ensaio (Figura 44 b)). As bases dos provetes foram previamente limpas e lixadas, sendo que a base do provete menos contaminada foi colocada em água. Os provetes foram pesados com uma balança de precisão  $\pm 0.01\text{g}$ .



Figura 44 – a) Impermeabilização dos provetes; b) Ensaio de absorção de água por capilaridade; c) Icosit K-101N A; d) Icosit K-101N B.

As 4 principais argamassas foram ensaiadas com os resultados das misturas sem SP apresentados na Tabela 22 e na Tabela 23 apresentados os resultados obtidos para as misturas com o aditivo.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas sem SP.

| Ref.  | Massa inicial<br>$M_i$ (kg) | Massa final<br>$M_f$ (Kg) | Variação da massa<br>$\Delta m_{t=24h}$ ,<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Área<br>$A$ (m <sup>2</sup> ) | Coefficiente de absorção<br>$A_w$ , 24h<br>(kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ) | Coefficiente de absorção médio<br>$A_w$ , 24h<br>(kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ) | Classificação<br>BS EN 998-1<br>[144] |
|-------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 2.3_1 | 0.32423                     | 0.32470                   | 0.00047                                                           | 0.001620                      | 0.00099                                                                          | 0.00109 ±<br>0.00007785                                                                | W2                                    |
| 2.3_2 | 0.32061                     | 0.32119                   | 0.00058                                                           | 0.001676                      | 0.00118                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 2.3_3 | 0.31310                     | 0.31362                   | 0.00052                                                           | 0.001618                      | 0.00109                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 3.1_1 | 0.32993                     | 0.33017                   | 0.00024                                                           | 0.001641                      | 0.00050                                                                          | 0.00072 ±<br>0.00021016                                                                | W2                                    |
| 3.1_2 | 0.34479                     | 0.34511                   | 0.00032                                                           | 0.001670                      | 0.00065                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 3.1_3 | 0.32962                     | 0.33010                   | 0.00048                                                           | 0.001633                      | 0.00100                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 5.2_1 | 0.32289                     | 0.32342                   | 0.00053                                                           | 0.001618                      | 0.00111                                                                          | 0.00139 ±<br>0.00027634                                                                | W2                                    |
| 5.2_2 | 0.32801                     | 0.33177                   | 0.00376                                                           | 0.001644                      | 0.00778                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 5.2_3 | 0.32527                     | 0.32608                   | 0.00081                                                           | 0.001653                      | 0.00167                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 6.3_1 | 0.36041                     | 0.36098                   | 0.00057                                                           | 0.001727                      | 0.00112                                                                          | 0.00117 ±<br>0.00015034                                                                | W2                                    |
| 6.3_2 | 0.36337                     | 0.36388                   | 0.00051                                                           | 0.001709                      | 0.00101                                                                          |                                                                                        |                                       |
| 6.3_3 | 0.33544                     | 0.33611                   | 0.00067                                                           | 0.001659                      | 0.00137                                                                          |                                                                                        |                                       |

O ensaio de absorção permitiu avaliar as diferentes composições de argamassa a infiltração de água ao longo de 24 horas. Como já referido anteriormente, o comportamento hídrico das argamassas está diretamente relacionado com a sua porosidade, sendo influenciada entre outros fatores, pela proporção de ligantes, pela granulometria e também pela relação entre  $a/l$ .

A argamassa 3.1 foi a que se destacou por ser a mais resistente à absorção de água por capilaridade ( $A_w = 0.00072 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ), tendo uma estrutura mais densa e menos porosa que as outras argamassas testadas. Este comportamento pode estar associado à maior proporção de cimento, que proporciona uma matriz mais coesa e compacta assim como esta argamassa ter uma menor relação de  $a/l = 0.371$ . A mistura 2.3 apresentou um coeficiente médio de  $0.00109 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ , indicando uma boa resistência à absorção por capilaridade. A relação  $a/l$  ( $a/l = 0.386$ ), apesar de não ser das mais baixas, está dentro do intervalo considerado adequado. Relativamente à argamassa 6.3, bastante similar em termos de composição à 3.1, apresentou um comportamento intermédio, com um valor de  $A_w = 0.00117 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ , coerente com a sua composição e relação  $a/l = 0.383$ . A diferença da proporção de agregado ajuda a explicar um valor mais elevado de absorção. Já a 5.2 obteve o valor do coeficiente médio mais elevado de  $0.00139 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ , com variação significativa entre os provetes. O valor extremo registado no provete 2 (0.00778) poderá ser resultado de uma falha de impermeabilização ou descontinuidade no provete. A elevada relação  $a/l$  (0.400) pode também justificar a maior porosidade obtida.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas com SP.

| Ref.  | Massa inicial<br>$M_i$ (kg) | Massa final<br>$M_f$ (kg) | Variação da massa<br>$\Delta m_{t=24h}$<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Área<br>$A$ (m <sup>2</sup> ) | Coeficiente de absorção<br>$A_w, 24h$<br>(kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ) | Coeficiente de absorção médio<br>(kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ) | Classificação<br>BS EN 998-1<br>[144] |
|-------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 2.3_1 | 0.33637                     | 0.33658                   | 0.00021                                                         | 0.001651                      | 0.00043                                                                        | 0.00047 ± 0.00002697                                                   | W2                                    |
| 2.3_2 | 0.33568                     | 0.33591                   | 0.00023                                                         | 0.001633                      | 0.00048                                                                        |                                                                        |                                       |
| 2.3_3 | 0.33990                     | 0.34014                   | 0.00024                                                         | 0.001644                      | 0.00050                                                                        |                                                                        |                                       |
| 3.1_1 | 0.35703                     | 0.35725                   | 0.00022                                                         | 0.001668                      | 0.00045                                                                        | 0.00039 ± 0.00010284                                                   | W2                                    |
| 3.1_2 | 0.35527                     | 0.35539                   | 0.00012                                                         | 0.001663                      | 0.00025                                                                        |                                                                        |                                       |
| 3.1_3 | 0.34864                     | 0.34887                   | 0.00023                                                         | 0.001644                      | 0.00048                                                                        |                                                                        |                                       |
| 5.2_1 | 0.34120                     | 0.34154                   | 0.00034                                                         | 0.001672                      | 0.00069                                                                        | 0.00063 ± 0.00004451                                                   | W2                                    |
| 5.2_2 | 0.34508                     | 0.34538                   | 0.00030                                                         | 0.001663                      | 0.00061                                                                        |                                                                        |                                       |
| 5.2_3 | 0.33720                     | 0.33748                   | 0.00028                                                         | 0.001623                      | 0.00059                                                                        |                                                                        |                                       |
| 6.3_1 | 0.33125                     | 0.33145                   | 0.00020                                                         | 0.001629                      | 0.00042                                                                        | 0.00039 ± 0.00002622                                                   | W2                                    |
| 6.3_2 | 0.33721                     | 0.33740                   | 0.00019                                                         | 0.001652                      | 0.00039                                                                        |                                                                        |                                       |
| 6.3_3 | 0.34106                     | 0.34123                   | 0.00017                                                         | 0.001635                      | 0.00035                                                                        |                                                                        |                                       |

Reduzindo a quantidade de água das misturas, pela inclusão de SP, a relação  $a/l$  também irá diminuir. Estas novas composições têm implicações diretas na porosidade da matriz, o que acaba por ter implicações também na capacidade de absorção de água por capilaridade, sendo que os resultados apresentados na Tabela 23 provam isso mesmo.

Analisando a Tabela 24, pode-se perceber que todas as misturas apresentaram valores de coeficiente de absorção mais baixos do que as respetivas versões sem aditivo. O uso de aditivo provocou uma redução entre 45% e 67%, o que vai de acordo com o expectável, sendo a relação  $a/l$  entre 0,29 e 0,34, o que comprova que misturas com menos água têm menor porosidade e por consequente menor absorção de água, como já mencionado pelo estudo de Van der Putten et al. [145]. As formulações com valor mais baixo das 8 misturas testadas são a 3.1 e a 6.3, com valores de coeficiente de absorção iguais de 0.00039

$\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ . Estudos recentes, como o de Pessoa et al., apresentaram valores do coeficiente de absorção para uma argamassa de I3D à base de cimento de 0.00071 ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) [146]. No estudo de Borges et al. [147], obtiveram-se valores de 0.13-0.14 ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) para uma argamassa de revestimento à base de cimento, o que, comparando com os valores obtidos no presente estudo, indicam que as argamassas deste estudo apresentam menos poros e uma matriz mais densa.

Tabela 24 – Comparação do  $A_w$  com e sem SP.

| Ref. | Coef. sem SP<br>( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) | Coef. com SP<br>( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) | Variação do<br>coeficiente | Redução<br>(%) |
|------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|----------------|
| 2.3  | 0.00109                                           | 0.00047                                           | -0.00062                   | 56.88          |
| 3.1  | 0.00072                                           | 0.00039                                           | -0.00033                   | 45.83          |
| 5.2  | 0.00139                                           | 0.00063                                           | -0.00076                   | 54.68          |
| 6.3  | 0.00117                                           | 0.00039                                           | -0.00078                   | 66.67          |

Os gráficos das curvas resultantes dos ensaios estão representados nas Figura 45 e Figura 46 e representam a absorção de água em função do tempo em  $\text{s}^{1/2}$ , sendo perceptível a absorção mais intensa nos primeiros minutos do ensaio e depois uma absorção mais estável, o que sugere que há um decréscimo da absorção de água ao longo do ensaio.

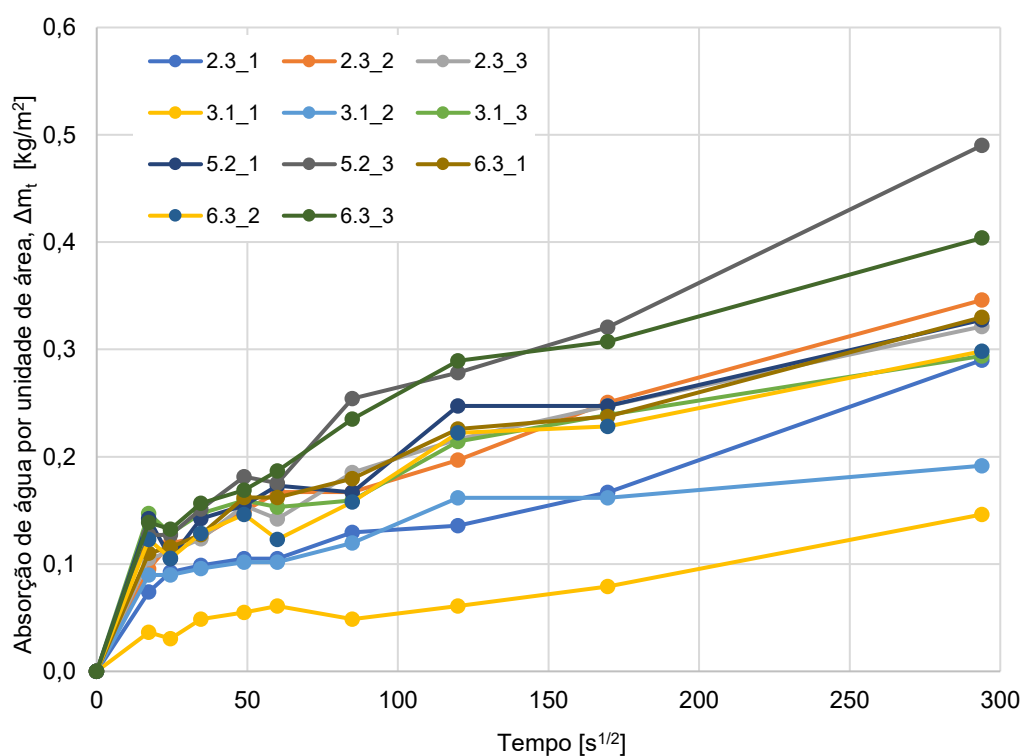


Figura 45 – Curvas de absorção das argamassas sem SP.

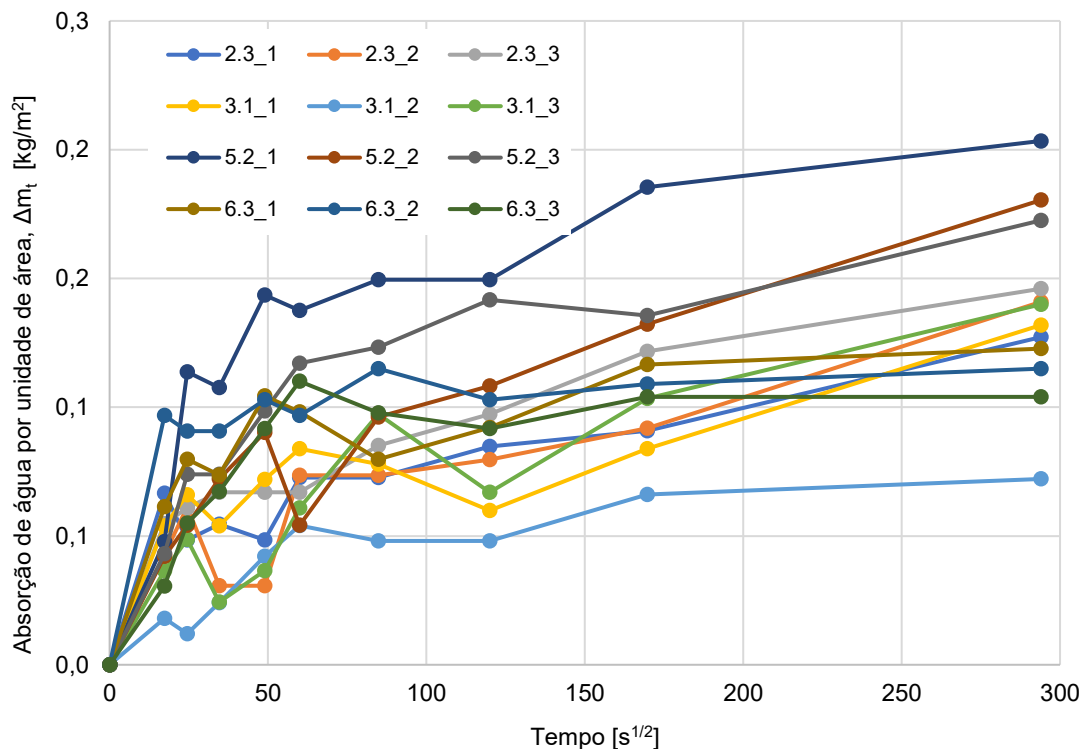


Figura 46 – Curvas de absorção das argamassas com SP.

#### 4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

No presente capítulo foi avaliado o desempenho das diferentes formulações das argamassas desenvolvidas: ao nível da impressão, com foco na trabalhabilidade, extrudabilidade e capacidade de construção e ao nível dos ensaios no estado fresco (abaixamento + espalhamento) e dos ensaios no estado endurecido, com a avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade.

As variáveis analisadas incluíram a proporção de ligante (cimento e cal hidráulica), a quantidade de agregados, a relação a/l, agr/l e, por fim, o efeito da adição de SP, tanto nas propriedades mecânicas como na redução da água das misturas, sem comprometer a trabalhabilidade.

Nos ensaios no estado fresco, os valores de espalhamento variaram entre 205 mm e 220 mm, enquadrando-se dentro da faixa de valores considerada adequada, conforme referenciado por Ma et al. [137] (174 – 210 mm) e Tay et al. (150 – 190 mm) [138]. Já os valores de abaixamento variaram entre 10 e 16 mm. Estes dois parâmetros são determinantes para aferir a trabalhabilidade e extrudabilidade da argamassa logo após a mistura.

Nos testes de impressão, os critérios de avaliação basearam-se na integridade estrutural, uniformidade de camadas, presença de deformações ou colapso e a qualidade do acabamento superficial das peças impressas. As argamassas 2.3, 3.1, 5.2 e 6.3 destacaram-se por apresentarem os melhores desempenhos, enquanto as misturas com maior percentagem de cal foram descartadas por não terem um comportamento adequado: deformações, baixa capacidade de construção e um acabamento imperfeito. Observou-se ainda que misturas com proporções mais elevadas de cimento apresentaram camadas mais definidas e melhor coesão.

As argamassas com SP demonstraram melhorias significativas na resistência à compressão (com ganhos de 14% a 19%), assim como uma redução expressiva no coeficiente de absorção de água por capilaridade

(entre -45% e -67%), evidenciando menor porosidade. Contudo, notou-se também uma redução do tempo de abertura, o que exigiu ajustes no processo de extrusão, tendo algumas misturas revelado entupimentos e perda de continuidade.

No estado endurecido, os provetes selecionados apresentaram resistências mecânicas compatíveis com os requisitos de uma argamassa aplicável à I3D em contextos de reabilitação patrimonial, sobretudo para elementos não estruturais de pequena escala. A relação  $a/l$  foi um fator determinante: os melhores resultados foram obtidos com rácios entre 0.29 e 0.34, em linha com os valores encontrados na literatura para argamassas sem aditivos. Verificou-se também que as formulações com maior quantidade de cimento atingiram resistência à compressão mais elevadas (65 e 74 MPa com SP). A resistência à flexão variou entre 6 e 8.4 MPa.

A análise do coeficiente de absorção por capilaridade reforçou a importância do controlo da porosidade e da granulometria dos constituintes, sendo também confirmado que argamassas com menor relação  $a/l$  e com SP absorvem menos água, indicando menor porosidade, tendo sido observados valores significativamente inferiores aos de argamassas convencionais, o que posiciona as misturas desenvolvidas como potenciais candidatas para aplicações duráveis em contexto patrimonial.

Por fim, na Tabela 25 foram sistematizados os principais resultados experimentais das argamassas testadas, incluindo os principais parâmetros de avaliação dos ensaios de impressão, propriedades físicas e desempenho técnico.

Tabela 25 – Resumos dos resultados das argamassas com melhor desempenho.

| Ref.              | Avaliação da Impressão |                  |                          |                 | Avaliação Física                                              |                                                                         |
|-------------------|------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                   | Acabamento             | Trabalhabilidade | Capacidade de construção | Extrudabilidade | Resistências mecânicas (MPa)                                  | Absorção de água por capilaridade (kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ) |
| <b>2.3 sem SP</b> | Bom                    | Boa              | Alta                     | Média           | R <sub>c</sub> = 52.10 ± 1.64<br>R <sub>f</sub> = 6.50 ± 0.98 | 0.00109                                                                 |
| <b>3.1 sem SP</b> | Excelente              | Boa              | Muito alta               | Boa             | R <sub>c</sub> = 64.20 ± 1.96<br>R <sub>f</sub> = 7.10 ± 0.36 | 0.00072                                                                 |
| <b>5.2 sem SP</b> | Bom                    | Média            | Alta                     | Boa             | R <sub>c</sub> = 48.90 ± 1.16<br>R <sub>f</sub> = 6.40 ± 0.36 | 0.00139                                                                 |
| <b>6.3 sem SP</b> | Bom                    | Boa              | Alta                     | Boa             | R <sub>c</sub> = 62.20 ± 1.15<br>R <sub>f</sub> = 7.40 ± 0.52 | 0.00117                                                                 |
| <b>2.3 com SP</b> | Bom                    | Bom              | Alta                     | Média           | R <sub>c</sub> = 61.80 ± 1.87<br>R <sub>f</sub> = 6.80 ± 0.24 | 0.00047                                                                 |
| <b>3.1 com SP</b> | Excelente              | Bom              | Muito alta               | Boa             | R <sub>f</sub> = 6.80 ± 0.24<br>R <sub>f</sub> = 7.40 ± 0.36  | 0.00039                                                                 |
| <b>5.2 com SP</b> | Bom                    | Média            | Alta                     | Boa             | R <sub>c</sub> = 52.70 ± 1.61<br>R <sub>f</sub> = 6.50 ± 0.30 | 0.00063                                                                 |
| <b>6.3 com SP</b> | Bom                    | Bom              | Alta                     | Boa             | R <sub>c</sub> = 64.90 ± 1.22<br>R <sub>f</sub> = 7.60 ± 0.42 | 0.00039                                                                 |

A Tabela 26 apresenta uma síntese comparativa dos valores obtidos neste estudo para os ensaios mecânicos e de durabilidade das argamassas, em relação à literatura existente. Os dados incluem formulações tradicionais, argamassas desenvolvidas especificamente para impressão 3D (I3D), bem como os resultados das formulações otimizadas com adição de superplastificante.

Tabela 26 – Síntese dos valores dos ensaios.

| Ensaio                          | Tipo de argamassa                           | Valor obtido | Unidade | Referência      |
|---------------------------------|---------------------------------------------|--------------|---------|-----------------|
| <b>Resistência à compressão</b> | Argamassa tradicional: cimento, cal e areia | 4.16 - 7.91  | MPa     | [139]           |
|                                 | Argamassa I3D reforçada com fibras          | 48 - 52      | MPa     | [143]           |
|                                 | Argamassa I3D                               | 48 - 64      | MPa     | Presente estudo |
|                                 | Argamassas com SP                           | 52 - 74      | MPa     | Presente estudo |
| <b>Resistência à flexão</b>     | Argamassa tradicional                       | 1.23 - 2.21  | MPa     | [139]           |
|                                 | Argamassa I3D reforçada com fibras          | 6.00 - 8.30  | MPa     | [143]           |

|                                          |                                       |                   |                                    |                 |
|------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------|
| <b>Absorção de água por capilaridade</b> | Argamassa I3D                         | 6.40 - 8.40       | MPa                                | Presente estudo |
|                                          | Argamassa I3D com SP                  | 6.40 - 7.40       | MPa                                | Presente estudo |
|                                          | Argamassas com SP                     | 0.00039 - 0.00063 | kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> | Presente estudo |
|                                          | Argamassa I3D                         | 0.00072 - 0.00139 | kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> | Presente estudo |
|                                          | Argamassa cimentícia I3D              | 0.00071           | kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> | [148]           |
|                                          | Argamassa de revestimento tradicional | 0.13 - 0.14       | kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> | [147]           |

# 5

## CONCLUSÕES

### 5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Foi possível retirar algumas conclusões gerais do trabalho realizado:

- Todas as argamassas ensaiadas no estado endurecido apresentaram valores de resistência à compressão, flexão e absorção de água por capilaridade dentro dos valores esperados para argamassas com aplicação a I3D, mas bastante superiores as argamassas usadas originalmente revelando um comportamento aceitável para aplicação em elementos não estruturais, como componentes de fachada ou peças de ornamentos.
- As formulações com mais cal que continham a mesma proporção de cal em relação ao cimento (50%/50%), foram descartadas, uma vez que demonstraram fraca extrudabilidade, menor capacidade de construção e um acabamento inferior acabamento, resultando em composições imprimíveis, mas instáveis para I3D.
- A introdução do SP permitiu reduzir o rácio de a/l das misturas, aumentando assim a sua fluidez sem comprometer a resistência mecânica. No entanto, foi associado um efeito negativo: a redução do tempo de abertura. Esta perda acelerada de trabalhabilidade levou a entupimentos do extrusor, algumas peças foram impressas novamente com a mesma composição, mas com resultados ligeiramente diferentes.
- Os objetivos definidos no início deste trabalho foram globalmente atingidos e das formulações testadas, oito demostram um comportamento adequado em termos de extrudabilidade, printabilidade, capacidade de construção, acabamento e resistência mecânica. Estas misturas combinam bons desempenho no estado fresco e endurecido, sendo organizadas por ordem de potencialidade para I3D: primeiro, argamassas com 75% de cimento e 25% de cal, depois argamassas com 60% de cimento e 40% de cal e, por fim, argamassas com 50% de cimento e 50% de cal, também é possível concluir que argamassas com menos agregado apresentam um acabamento e propriedades melhores.
- As misturas desenvolvidas apresentaram rácios a/l entre 0.29-0.33 com SP e de 0.37-0.40 sem SP, alinhando-se com os valores encontrados na literatura e recomendados para argamassas deste género. Os testes de absorção capilar confirmaram que um teor de cimento mais elevado e rácios de a/l mais baixos levaram a uma redução da porosidade e da absorção de água. Os testes de resistência à flexão e à compressão destacaram o impacto da composição do ligante, da proporção de agregados e da utilização de aditivos.

## 5.2. CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

Este estudo contribui para o avanço da aplicação da I3D na reabilitação patrimonial, demonstrando que argamassas tradicionais à base de cal e cimento podem ser otimizadas para I3D garantindo fluidez, resistência e compatibilidade com elementos históricos. Demonstrou-se assim a viabilidade técnica de produzir peças complexas com qualidade e compatibilidade estética.

Ao longo do trabalho, foram desenvolvidas misturas com um bom desempenho, apresentando um equilíbrio entre os vários parâmetros fundamentais da I3D, nomeadamente trabalhabilidade, capacidade de construção, extrudabilidade, e acabamento, além de terem sido determinados outros parâmetros importantes, como a resistência e a durabilidade das argamassas otimizadas.

O estudo forneceu dados experimentais úteis para compreensão dos impactos da proporção de cimento/cal, da relação a/l, da relação agr/l e da adição de aditivos na reologia, resistência e na durabilidade das argamassas.

Concluindo, foi possível demonstrar que a I3D pode representar uma nova abordagem na preservação do património. A capacidade de produzir peças com precisão, aliada à grande facilidade de personalização com base em modelos digitais, oferece uma solução moderna para responder às exigências do restauro, abrindo assim caminhos para métodos de reabilitação mais sustentáveis, rápidos e precisos.

## 5.3. LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos avanços alcançados com a presente investigação, importa reconhecer que algumas limitações foram surgindo ao longo da realização deste trabalho, nomeadamente relacionadas com os equipamentos utilizados. Por exemplo, durante algumas sessões de impressão, o bico da impressora entupiu, não devido à trabalhabilidade ou à perda de tempo de abertura da argamassa, mas devido à geometria do bico, pouco adequada a certos tipos de misturas. Esta situação acabou por comprometer algumas das sessões de impressão realizadas, o que obrigava, em alguns casos, a uma interrupção da impressão a meio para limpeza do bico, influenciando a qualidade final das peças.

Tendo em conta os resultados obtidos com a investigação efetuada neste estudo, e as limitações inerentes que foram surgindo ao longo do trabalho, identificam-se várias possibilidades de trabalhos futuros:

- Para garantir que as soluções desenvolvidas têm aplicabilidade em contexto real, será fundamental testar as argamassas com o modelo 3D da mísula do TNSJ, como demonstrado no estudo de Jesus et al. [149]. Deste modo será possível perceber melhor o comportamento das argamassas relativamente à capacidade de construção, ao acabamento, à qualidade estrutural e mesmo eventuais limitações operacionais relacionadas com o sistema de impressão utilizado.
- Análise da durabilidade: será fundamental aprofundar o estudo da durabilidade das melhores argamassas otimizadas sobretudo em condições adversas, como ciclos de gelo-degelo, variações térmicas agressivas, exposição prolongada a sais solúveis, nomeadamente em ambientes marinhos e em contacto com a água.
- Comportamento estrutural e sísmico: sugere-se a análise do desempenho estrutural e do comportamento sísmico das peças impressas com as argamassas desenvolvidas, tendo em vista a aplicação em contextos reais de reabilitação patrimonial.
- Otimização das argamassas em sistemas de impressão alternativos: considerando que uma boa impressão está diretamente relacionada não só com a argamassa, mas também com o sistema de

impressão utilizado, seria pertinente adaptar e testar estas argamassas a sistemas de impressão distintos, como os braços robóticos ou impressoras de maior escala, que iriam permitir maior flexibilidade em termos geométricos e dimensionais.

- Caracterização mais profunda das argamassas: por limitações de tempo, algumas propriedades importantes para o desempenho de uma argamassa para I3D não foram avaliadas neste estudo, como a real capacidade de construção das argamassas, assim como o tempo aberto e também de propriedades relacionadas com compatibilidade dos materiais como porosidade e aderência ao substrato. A caracterização destes parâmetros irá permitir uma compressão mais abrangente do comportamento dos materiais em diferentes fases durante o processo de impressão.
- Estudo do suporte e sistema de fixação das peças impressas: será igualmente relevante avaliar a forma como as mísulas impressas podem ser integradas nos edifícios reais, considerando a adesão ao substrato, a estabilidade do conjunto e a compatibilidade física e química entre materiais. A investigação de diferentes soluções de assentamento comparando com a realmente usada (com argamassas de colagem ou fixações mecânicas) permitirá garantir uma aplicação eficaz e reversível, respeitando os princípios da conservação do património.

#### **5.4. PUBLICAÇÕES**

No seguimento do desenvolvimento deste projeto de investigação, está prevista a publicação de um artigo científico, com o objetivo de sintetizar os principais resultados obtidos neste estudo. Este passo será relevante para validação e divulgação científica do trabalho realizado, contribuindo para o avanço do conhecimento na área da I3D, especialmente no contexto da reabilitação e conservação do património arquitetónico.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Amran *et al.*, “3D-printable alkali-activated concretes for building applications: A critical review,” *Constr Build Mater*, vol. 319, p. 126126, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126126.
- [2] CIB Commission, *Guide for the structural rehabilitation of heritage buildings*. CIB Publication, 2010. Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18446.pdf>
- [3] Bernard M. Feilden, *Conservation of Historic Buildings*, 3rd ed. 2003. Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: [https://books.google.pt/books?hl=zh-CN&lr=&id=vwgKT4ouVt4C&oi=fnd&pg=PP2&dq=Conservation+of+historic+buildings&ots=YEQ6yDuLHm&sig=apAKyu5m9bBcbkHWtsoOCOpP038&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Conservation%20of%20historic%20buildings&f=false](https://books.google.pt/books?hl=zh-CN&lr=&id=vwgKT4ouVt4C&oi=fnd&pg=PP2&dq=Conservation+of+historic+buildings&ots=YEQ6yDuLHm&sig=apAKyu5m9bBcbkHWtsoOCOpP038&redir_esc=y#v=onepage&q=Conservation%20of%20historic%20buildings&f=false)
- [4] B.-C. Lyu, C. Ding, L.-P. Guo, B. Chen, and A. Wang, “Basic performances and potential research problems of strain hardening geopolymers composites: A critical review,” *Constr Build Mater*, vol. 287, p. 123030, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123030.
- [5] E. Kynbraten and K. Larsstuen, “Technical requirements for measures in existing buildings - Collection of examples,” 2015, Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: [https://scholar.google.com/scholar?q=Kynbraten%2C%20E.%2C%20%26%20Larsstuen%2C%20K.%20\(2015\).%20Tekniske%20krav%20ved%20tiltak%20i%20eksisterende%20bygg%E2%80%94Eksempelsamling%20\(Technical%20requirements%20for%20measures%20in%20existing%20buildings%E2%80%94Collection%20of%20examples\).%20https%3A%2F%2Fglobalassets%2Feksisterende-bygg%2Fveiledningsstoff%2Ftekniske-krav-ved-tiltak-i-eksisterende-bygg\\_eksempelsamling\\_nkf.pdf](https://scholar.google.com/scholar?q=Kynbraten%2C%20E.%2C%20%26%20Larsstuen%2C%20K.%20(2015).%20Tekniske%20krav%20ved%20tiltak%20i%20eksisterende%20bygg%E2%80%94Eksempelsamling%20(Technical%20requirements%20for%20measures%20in%20existing%20buildings%E2%80%94Collection%20of%20examples).%20https%3A%2F%2Fglobalassets%2Feksisterende-bygg%2Fveiledningsstoff%2Ftekniske-krav-ved-tiltak-i-eksisterende-bygg_eksempelsamling_nkf.pdf)
- [6] Unesco, “Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage. Artigo 1º,” Unesco. Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>
- [7] J. Xu, L. Ding, and P. E. D. Love, “Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing,” *Autom Constr*, vol. 76, pp. 85–96, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- [8] M. S. Döndüren and O. Sişik, “Materials, used in historical buildings, analysis methods and solutions proposals,” *E3S Web of Conferences*, vol. 19, p. 03019, Oct. 2017, doi: 10.1051/e3sconf/20171903019.
- [9] J. Armesto-González, B. Riveiro-Rodríguez, D. González-Aguilera, and M. T. Rivas-Brea, “Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings,” *J Archaeol Sci*, vol. 37, no. 12, pp. 3037–3047, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.jas.2010.06.031.

- [10] C. Ornelas, J. M. Guedes, and I. Breda-Vázquez, “Cultural built heritage and intervention criteria: A systematic analysis of building codes and legislation of Southern European countries,” *J Cult Herit*, vol. 20, pp. 725–732, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.culher.2016.02.013.
- [11] F. G. Matero, “Ethics and Policy in Conservation,” *Getty Conservation Institute Newsletter*, vol. 15, 2000.
- [12] M. Higuera, A. I. Calero, and F. J. Collado-Montero, “Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 20, p. e00179, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.daach.2021.e00179.
- [13] D. Chapinal-Heras *et al.*, “Photogrammetry, 3D modelling and printing: The creation of a collection of archaeological and epigraphical materials at the university,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 33, p. e00341, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.daach.2024.e00341.
- [14] F. Arias, C. Enríquez, J. M. Jurado, L. Ortega, A. Romero-Manchado, and J. J. Cubillas, “Use of 3D models as a didactic resource in archaeology. A case study analysis,” *Herit Sci*, vol. 10, no. 1, p. 112, Jul. 2022, doi: 10.1186/s40494-022-00738-x.
- [15] M. R. Veiga and P. Faria, “O papel das argamassas na durabilidade das alvenarias antigas,” 2018.
- [16] A. Arizzi, H. Viles, and G. Cultrone, “Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings,” *Constr Build Mater*, vol. 28, no. 1, pp. 807–818, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.059.
- [17] A. Oliveira, A. S. Pereira, P. C. Lemos, J. P. Guerra, V. Silva, and P. Faria, “Effect of innovative bioproducts on air lime mortars,” *Journal of Building Engineering*, vol. 35, p. 101985, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101985.
- [18] A. E. Charola, “Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview,” *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 39, no. 3, 2000, doi: 10.2307/3179977.
- [19] A. Moropoulou, A. Bakolas, and S. Anagnostopoulou, “Composite materials in ancient structures,” *Cem Concr Compos*, vol. 27, no. 2, pp. 295–300, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018.
- [20] P. Maurenbrecher, “RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry,” *Mater Struct*, vol. 45, no. 9, pp. 1303–1309, Sep. 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9849-7.
- [21] G. Wads Torracca, *Porous building materials: materials science for architectural conservation*. 2005.
- [22] B. Rangel, A. S. Guimarães, J. Lino, and L. Santana, Eds., *3D Printing for Construction with Alternative Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-09319-7.

- [23] C. Weller, R. Kleer, and F. T. Piller, “Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited,” *Int J Prod Econ*, vol. 164, pp. 43–56, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.02.020.
- [24] Adria, “Revolucionando a indústria automotiva: inovações em impressão 3D explicadas.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://kingsunmachining.com/pt/blog/revolutionizing-the-automotive-industry-3d-printing-innovations-explained/#>
- [25] A. Ben-Ner and E. Siemsen, “Decentralization and Localization of Production,” *Calif Manage Rev*, vol. 59, no. 2, pp. 5–23, Feb. 2017, doi: 10.1177/0008125617695284.
- [26] M. Jesus, A. S. Guimarães, B. Rangel, and J. Lino Alves, “The potential of 3D printing in building pathology: rehabilitation of cultural heritage,” *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 41, no. 3, pp. 647–674, Jul. 2023, doi: 10.1108/IJBPA-03-2022-0053.
- [27] V. Jain, P. Ajmera, S. Kalra, and S. Yadav, “Addictive manufacturing in the Health 4.0 era: a systematic review,” in *Advances in Additive Manufacturing Artificial Intelligence, Nature-Inspired, and Biomanufacturing*, Elsevier, 2023, pp. 27–41. doi: 10.1016/B978-0-323-91834-3.00018-1.
- [28] Y. Gao, B. Li, W. Wang, W. Xu, C. Zhou, and Z. Jin, “Watching and Safeguarding Your 3D Printer,” *Proc ACM Interact Mob Wearable Ubiquitous Technol*, vol. 2, no. 3, pp. 1–27, Sep. 2018, doi: 10.1145/3264918.
- [29] ISO/ASTM International 2023, *Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements*, 1st ed. 2023.
- [30] S. Pessoa, A. S. Guimarães, S. S. Lucas, and N. Simões, “3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110794, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110794.
- [31] ASTM International, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, Designation: F2792 – 12a.”
- [32] T. Tabassum and A. Ahmad Mir, “A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction,” *Mater Today Proc*, vol. 93, pp. 408–414, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.013.
- [33] T. Wangler *et al.*, “Digital Concrete: Opportunities and Challenges,” *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 67–75, Oct. 2016, doi: 10.21809/rilemtechlett.2016.16.
- [34] J. Cai, J. Wang, Q. Zhang, C. Du, M. Meloni, and J. Feng, “State-of-the-art of mechanical properties of 3D printed concrete,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03847, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03847.

- [35] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes,” *Autom Constr*, vol. 21, pp. 262–268, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
- [36] G. Ma, L. Wang, and Y. Ju, “State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction,” *Sci China Technol Sci*, vol. 61, no. 4, pp. 475–495, Apr. 2018, doi: 10.1007/s11431-016-9077-7.
- [37] R. Huang, J.-J. Chen, and K.-S. Sun, “Planning gang formwork operations for building construction using simulations,” *Autom Constr*, vol. 13, no. 6, pp. 765–779, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.autcon.2004.05.001.
- [38] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes,” *Autom Constr*, vol. 21, pp. 262–268, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
- [39] D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, and B. Dillenburger, “Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 50–65, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
- [40] B. Panda, S. Chandra Paul, and M. Jen Tan, “Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material,” *Mater Lett*, vol. 209, pp. 146–149, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2017.07.123.
- [41] S. Banerjee, S. Nayak, and S. Das, “Enhancing the flexural behaviour of masonry wallet using PP band and steel wire mesh,” *Constr Build Mater*, vol. 194, pp. 179–191, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.001.
- [42] 3D Distributed, “Gantry 3D Printer.” Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: <https://3ddistributed.com/3d-printers/workhorse-printer/gantry-3d-printer/>
- [43] Anas ESSOP, “TECLA: WASP and MCA develop 3D printed homes for sustainable living,” 2019, Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/tecla-wasp-and-mca-develop-3d-printed-homes-for-sustainable-living-163830/>
- [44] N. Cortes, “Chile team builds region’s first 3D printed ‘seed home.’” Accessed: Mar. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/technology/chile-team-builds-regions-first-3d-printed-seed-home-2024-10-22/>
- [45] Cybe, “CyBe R (Robot).” Accessed: Mar. 04, 2025. [Online]. Available: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/cybe-robot/>
- [46] WASP, “Delta WASP 3MT.” Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-cemento-delta-wasp-3mt-concrete/>
- [47] K. Dörfler *et al.*, “Additive Manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction,” *Cem Concr Res*, vol. 158, p. 106772, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106772.

- [48] Rory Stott, “Chinese Company Constructs the World’s Tallest 3D Printed Building,” Jan. 2015, Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building>
- [49] J. Teixeira, C. O. Schaefer, B. Rangel, L. Maia, and J. L. Alves, “A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art,” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 12, no. 2, pp. 337–360, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.foar.2022.10.001.
- [50] H. Hassan, E. Rodriguez-Ubinas, A. Al Tamimi, E. Trepici, A. Mansouri, and K. Almehairbi, “Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction,” *Autom Constr*, vol. 163, p. 105417, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105417.
- [51] K. V. Prasad, V. Vasugi, and G. Senthil Kumaran, “Application of 3D printing concepts in the Architecture Engineering and Construction (AEC) industry - A scientometric review,” *Mater Today Proc*, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.158.
- [52] J. Xu, L. Ding, and P. E. D. Love, “Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing,” *Autom Constr*, vol. 76, pp. 85–96, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- [53] M. Higuera, A. I. Calero, and F. J. Collado-Montero, “Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 20, p. e00179, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.daach.2021.e00179.
- [54] A. Porfyrus *et al.*, “Accelerated ageing and hydrolytic stabilization of poly(lactic acid) (PLA) under humidity and temperature conditioning,” *Polym Test*, vol. 68, pp. 315–332, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.04.018.
- [55] V. Tomei, E. Grande, M. A. Caponero, and M. Imbimbo, “3D-printing for the rehabilitation and health monitoring of structures with FBG: Experimental tests,” *Constr Build Mater*, vol. 416, p. 135067, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135067.
- [56] “<https://www.dezeen.com/2019/04/24/3d-printing-notre-dame-cathedral-concr3d/>.” Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2019/04/24/3d-printing-notre-dame-cathedral-concr3d/>
- [57] Guy Horton, “3-D Printing Saves a Frank Lloyd Wright Treasure.” Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://metropolismag.com/viewpoints/3-d-printing-saves-a-frank-lloyd-wright-treasure/>
- [58] “Architecture Firm Uses 3D Printing For Renovating Buildings.” Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/news/architecture-firm-uses-3d-printing-for-renovating-buildings/>
- [59] R. Nogueira, A. P. Ferreira Pinto, and A. Gomes, “Design and behavior of traditional lime-based plasters and renders. Review and critical appraisal of strengths and weaknesses,” *Cem Concr Compos*, vol. 89, pp. 192–204, May 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.005.

- [60] A. Duran, M. D. Robador, M. C. Jimenez de Haro, and V. Ramirez-Valle, “Study by thermal analysis of mortars belonging to wall paintings corresponding to some historical buildings of Sevillian art,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 92, no. 1, pp. 353–359, Apr. 2008, doi: 10.1007/s10973-007-8733-0.
- [61] M. Azeredo, *Técnicas de Construção*, vol. 1. 2005.
- [62] M. Margalha Goreti, “Argamassas.”
- [63] C. Wood, “Understanding and controlling the movement of moisture through solid stone masonry caused by driving rain,” University of Oxford, 2010.
- [64] V. Chu, L. Regev, S. Weiner, and E. Boaretto, “Differentiating between anthropogenic calcite in plaster, ash and natural calcite using infrared spectroscopy: implications in archaeology,” *J Archaeol Sci*, vol. 35, no. 4, pp. 905–911, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.jas.2007.06.024.
- [65] E. Uğurlu Sağın, H. E. Duran, and H. Böke, “Lime mortar technology in ancient eastern Roman provinces,” *J Archaeol Sci Rep*, vol. 39, p. 103132, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jasrep.2021.103132.
- [66] M. del M. Barbero-Barrera, L. Maldonado-Ramos, K. Van Balen, A. García-Santos, and F. J. Neila-González, “Lime render layers: An overview of their properties,” *J Cult Herit*, vol. 15, no. 3, pp. 326–330, May 2014, doi: 10.1016/j.culher.2013.07.004.
- [67] M. Doğruyol, “Characterization of historic mortars and the effect of rice husk ash (RHA) on quicklime,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03542, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03542.
- [68] D. A. Silva, H. R. Wenk, and P. J. M. Monteiro, “Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern,” *Thermochim Acta*, vol. 438, no. 1–2, pp. 35–40, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.tca.2005.03.003.
- [69] R. Malathy, R. Shanmugam, D. Dhamotharan, D. Kamaraj, M. Prabakaran, and J. Kim, “Lime based concrete and mortar enhanced with pozzolanic materials – State of art,” *Constr Build Mater*, vol. 390, p. 131415, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131415.
- [70] V. Nežerka, J. Antoš, J. Litoš, P. Tesárek, and J. Zeman, “An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading,” *Constr Build Mater*, vol. 114, pp. 913–924, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.013.
- [71] M. Doğruyol, “Characterization of historic mortars and the effect of rice husk ash (RHA) on quicklime,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03542, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03542.
- [72] Z. Pavlík *et al.*, “Lightweight pumice mortars for repair of historic buildings –Assessment of physical parameters, engineering properties and durability,” *Constr Build Mater*, vol. 404, p. 133275, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133275.
- [73] A. M. Neville, “Properties of concrete,” *Person Education*.

- [74] A. H. P. Maurenbrecher, “Mortars for repair of tradicional masonry,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 9.
- [75] A. Isebaert, L. Van Parys, and V. Cnudde, “Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone – A review,” *Constr Build Mater*, vol. 59, pp. 39–50, May 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.020.
- [76] M. I. Kanan, *Manual de Conservação e Intervenção em argamassas e Revestimentos à Base de Cal*. IPHAN, 2002.
- [77] F. Pacheco-Torgal, J. Faria, and S. Jalali, “Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?,” *Constr Build Mater*, vol. 30, pp. 488–494, May 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.003.
- [78] European Committee for Standardization, “EN 998-1 :Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar,” 2010.
- [79] M. G. Margalha, “Argamassas.”
- [80] R. Yan, F. Meng, G. Ke, and K. Jia, “Comparative evaluation of the applicability of 3D printing mortar with different waste powders,” *Constr Build Mater*, vol. 443, p. 137825, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137825.
- [81] J. Liu, P. Tran, V. Nguyen Van, C. Gunasekara, and S. Setunge, “3D printing of cementitious mortar with milled recycled carbon fibres: Influences of filament offset on mechanical properties,” *Cem Concr Compos*, vol. 142, p. 105169, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105169.
- [82] G. Beersaerts, J. Soete, M. Giels, L. Eykens, S. Lucas, and Y. Pontikes, “3D printing of an iron-rich slag based hybrid mortar. A durable, sustainable and cost-competitive product?,” *Cem Concr Compos*, vol. 144, p. 105304, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105304.
- [83] J. Cai, J. Wang, Q. Zhang, C. Du, M. Meloni, and J. Feng, “State-of-the-art of mechanical properties of 3D printed concrete,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03847, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03847.
- [84] J. Teixeira, C. O. Schaefer, L. Maia, B. Rangel, R. Neto, and J. L. Alves, “Influence of Supplementary Cementitious Materials on Fresh Properties of 3D Printable Materials,” *Sustainability*, vol. 14, no. 7, p. 3970, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14073970.
- [85] Y. Yang, C. Wu, Z. Liu, H. Wang, and Q. Ren, “Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing,” *Cem Concr Compos*, vol. 125, p. 104310, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104310.
- [86] J. Sun, F. Aslani, J. Lu, L. Wang, Y. Huang, and G. Ma, “Fibre-reinforced lightweight engineered cementitious composites for 3D concrete printing,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 19, pp. 27107–27121, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.06.124.

- [87] N. Roussel, “Rheological requirements for printable concretes,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 76–85, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.
- [88] M. Jesus, J. Teixeira, J. L. Alves, S. Pessoa, A. S. Guimarães, and B. Rangel, “Potential Use of Sugarcane Bagasse Ash in Cementitious Mortars for 3D Printing,” 2023, pp. 89–103. doi: 10.1007/978-3-031-18130-6\_7.
- [89] H. Bayat and A. Kashani, “Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar containing silica fume, hydrated lime, and blast furnace slag,” *Mater Today Commun*, vol. 37, p. 107128, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107128.
- [90] A. Dulaj, T. A. M. Salet, and S. S. Lucas, “Mechanical properties and self-sensing ability of graphene-mortar compositions with different water content for 3D printing applications,” *Mater Today Proc*, vol. 70, pp. 412–417, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.278.
- [91] A. P. Capêto, M. Jesus, B. E. B. Uribe, A. S. Guimarães, and A. L. S. Oliveira, “Building a Greener Future: Advancing Concrete Production Sustainability and the Thermal Properties of 3D-Printed Mortars,” *Buildings*, vol. 14, no. 5, p. 1323, May 2024, doi: 10.3390/buildings14051323.
- [92] J. Teixeira *et al.*, “Development of 3D printing sustainable mortars based on a bibliometric analysis,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 235, no. 6, pp. 1419–1429, Jun. 2021, doi: 10.1177/1464420721995210.
- [93] J. De Vlieger, J. Blaakmeer, E. Gruyaert, and Ö. Cizer, “Assessing static and dynamic yield stress of 3D printing mortar with recycled sand: Influence of sand geometry, fineness modulus, and water-to-binder ratio,” *Journal of Building Engineering*, vol. 101, p. 111827, May 2025, doi: 10.1016/j.jobbe.2025.111827.
- [94] G. H. A. Ting, Y. W. D. Tay, Y. Qian, and M. J. Tan, “Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties,” *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 21, no. 4, pp. 994–1003, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00857-x.
- [95] C. M. Rangel, A. S. Guimarães, T. A. M. Salet, and S. S. Lucas, “3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings,” *Constr Build Mater*, vol. 425, p. 136008, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136008.
- [96] J. , D. B. , C. P. , M. M. , H. H. , H. Z. , C. R. , J. S. and M. B. Huang, “On demand setting of extrusion-based 3D printing gypsum using heat-induced accelerator,” vol. 304, no. 124624, 2021.
- [97] CyBe, “CyBe Mortar.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/cybe-mortar/>
- [98] Saint-Gobain Portugal, “Construção 4.0: A digitalização e a construção aditiva - Desenvolvimento de argamassas para impressão 3D.” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online].

- Available: <https://www.saint-gobain.pt/blog/construcao-4.0-desenvolvimento-argamassas-impressao-3d>
- [99] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, and N. Meunier, “Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth,” *Mater Struct*, vol. 42, no. 8, pp. 1101–1116, Oct. 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9446-y.
- [100] H. Van Damme and H. Houben, “Earth concrete. Stabilization revisited,” *Cem Concr Res*, vol. 114, pp. 90–102, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [101] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Constr Build Mater*, vol. 29, pp. 512–519, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [102] A. Perrot, D. Rangeard, and E. Courteille, “3D printing of earth-based materials: Processing aspects,” *Constr Build Mater*, vol. 172, pp. 670–676, May 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017.
- [103] Y. Tarhan and A. Perrot, “Reinforcement of 3D printable earth-based mortar with natural textile material,” *Mater Today Proc*, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.056.
- [104] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, and J. Petric, “Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 8, pp. 1462–1468, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008.
- [105] Renata Cunha, “Gaia, a primeira casa impressa em 3D com terra crua e resíduos de arroz.” Accessed: Mar. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.stylourbano.com.br/gaia-a-primeira-casa-impressa-em-3d-com-terra-crua-e-residuos-de-arroz/>
- [106] “TerraPerforma - 3D Printed Performative Wall.” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: <https://iaac.net/project/terraperforma/>
- [107] A. Perrot *et al.*, “Snapshot on 3D printing with alternative binders and materials: Earth, geopolymers, gypsum and low carbon concrete,” *Cem Concr Res*, vol. 185, p. 107651, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107651.
- [108] M. Rahman, S. Rawat, R. (Chunhui) Yang, A. Mahil, and Y. X. Zhang, “A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites,” *Journal of Building Engineering*, vol. 91, p. 109719, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.109719.
- [109] J. Teixeira, C. O. Schaefer, B. Rangel, L. Maia, and J. L. Alves, “A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art,” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 12, no. 2, pp. 337–360, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.foar.2022.10.001.
- [110] M. Rahman, S. Rawat, R. (Chunhui) Yang, A. Mahil, and Y. X. Zhang, “A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites,” *Journal of Building Engineering*, vol. 91, p. 109719, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.109719.

- [111] D. L.R.N., “Argamassa térmica contendo vermiculita: uma revisão sistemática sobre suas propriedades nos estados frescos e endurecidos,” Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.
- [112] Y. Chen, S. Chaves Figueiredo, Ç. Yalçinkaya, O. Çopuroğlu, F. Veer, and E. Schlangen, “The Effect of Viscosity-Modifying Admixture on the Extrudability of Limestone and Calcined Clay-Based Cementitious Material for Extrusion-Based 3D Concrete Printing,” *Materials*, vol. 12, no. 9, p. 1374, Apr. 2019, doi: 10.3390/ma12091374.
- [113] H. Bayat and A. Kashani, “Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar containing silica fume, hydrated lime, and blast furnace slag,” *Mater Today Commun*, vol. 37, p. 107128, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107128.
- [114] Q. Shen *et al.*, “Fresh and anisotropic-mechanical properties of polyoxymethylene fibers reinforced 3D printable cementitious composites,” *Journal of Building Engineering*, vol. 103, p. 112140, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112140.
- [115] A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, and B. Khoshnevis, “Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture,” *Constr Build Mater*, vol. 145, pp. 639–647, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
- [116] L. Yang, S. M. E. Sepasgozar, S. Shirowzhan, A. Kashani, and D. Edwards, “Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete,” *Autom Constr*, vol. 146, p. 104671, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104671.
- [117] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 37–49, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [118] Renata Figueiredo Miranda de Vieira Paiva, “O Arquivo do Teatro Nacional S. João do Porto e a sua integração num sistema de informação,” Porto, 2023.
- [119] X. R. e N. V. P. Esmeralda Paupério, “Conservação das fachadas do Teatro Nacional de São João,” pp. 1–7, 2018. Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10216/133819>
- [120] A. G. N. V. P. X. R. Esmeralda Paupério, *Sebentas d’Obra #27, Reabilitação da fachada do Teatro São João, Porto*. 2023.
- [121] L. Almeida *et al.*, “Argamassas e Ligantes do Mercado do Bolhão e Teatro Nacional de São João, no Porto. Variabilidade e implicações para a sua reabilitação,” pp. 1–11, 2021, Accessed: Mar. 03, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10216/137629>
- [122] “Teatro Nacional de São João lança concursos públicos para obras de reabilitação.” Accessed: Mar. 11, 2025. [Online]. Available: <https://globalnews.pt/sociedade/teatro-nacional-de-sao-joao-lanca-concursos-publicos-para-obras-de-reabilitacao/>

- [123] “Teatro Nacional São João.” Accessed: Mar. 11, 2025. [Online]. Available: [https://portoinnovationhub.pt/fora\\_portas/teatro-nacional-sao-joao/](https://portoinnovationhub.pt/fora_portas/teatro-nacional-sao-joao/)
- [124] WASP, “WASP 40100 LDM.”
- [125] European Committee for Standardization, *Methods of test for mortar masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar ( by flow table)*. 1999.
- [126] European Committee for Standardization (CEN), *EN 196-1:2016 - Methods of testing cement - Part 1 : Determination of strength*. European Committee for Standardization, 2016.
- [127] ISO (International Organization for Standardization), *ISO 15148:2002(en) Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion*. 2002.
- [128] A. Marra, S. Gerbino, A. Greco, and G. Fabbrocino, “Combining Integrated Informative System and Historical Digital Twin for Maintenance and Preservation of Artistic Assets,” *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5956, Sep. 2021, doi: 10.3390/s21175956.
- [129] A. U. Rehman and J.-H. Kim, “3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics,” *Materials*, vol. 14, no. 14, p. 3800, Jul. 2021, doi: 10.3390/ma14143800.
- [130] J. Gołaszewski and J. Szwabowski, “Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars,” *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 2, pp. 235–248, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.07.002.
- [131] K. Manikandan, K. Wi, X. Zhang, K. Wang, and H. Qin, “Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing,” *Manuf Lett*, vol. 24, pp. 33–37, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.mfglet.2020.03.002.
- [132] W. Chen *et al.*, “Printability region for 3D-printable engineered cementitious composites (3DP-ECC),” *Cem Concr Compos*, vol. 151, p. 105599, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105599.
- [133] M. Papachristoforou, V. Mitsopoulos, and M. Stefanidou, “Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 10, pp. 155–162, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.09.023.
- [134] M. Gurunandan, H. Jeet Malla, and P. Nanthagopalan, “Effect of water to binder, aggregate to binder ratio and admixtures on printability and mechanical properties of 3D printable mortar mixtures,” *Journal of Building Engineering*, vol. 99, p. 111649, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.111649.
- [135] T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete,” *Mater Struct*, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232, Aug. 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9828-z.

- [136] M.-H. Zhang, K. Sisomphon, T. S. Ng, and D. J. Sun, “Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 9, pp. 1700–1707, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.021.
- [137] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, “Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing,” *Constr Build Mater*, vol. 162, pp. 613–627, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051.
- [138] Y. W. D. Tay, Y. Qian, and M. J. Tan, “Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test,” *Compos B Eng*, vol. 174, p. 106968, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.
- [139] A. Zagaroli, J. Kubica, I. Galman, and K. Falkjar, “Study on the Mechanical Properties of Two General-Purpose Cement–Lime Mortars Prepared Based on Air Lime,” *Materials*, vol. 17, no. 5, p. 1001, Feb. 2024, doi: 10.3390/ma17051001.
- [140] Y.-F. Li, P.-J. Tsai, J.-Y. Syu, M.-H. Lok, and H.-S. Chen, “Mechanical Properties of 3D-Printed Carbon Fiber-Reinforced Cement Mortar,” *Fibers*, vol. 11, no. 12, p. 109, Dec. 2023, doi: 10.3390/fib11120109.
- [141] H. Lee, J.-H. J. Kim, J.-H. Moon, W.-W. Kim, and E.-A. Seo, “Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar,” *Materials*, vol. 12, no. 24, p. 4104, Dec. 2019, doi: 10.3390/ma12244104.
- [142] K. C. Hover, “The influence of water on the performance of concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 7, pp. 3003–3013, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.01.010.
- [143] Y.-F. Li, P.-J. Tsai, J.-Y. Syu, M.-H. Lok, and H.-S. Chen, “Mechanical Properties of 3D-Printed Carbon Fiber-Reinforced Cement Mortar,” *Fibers*, vol. 11, no. 12, p. 109, Dec. 2023, doi: 10.3390/fib11120109.
- [144] Mortar Industry Association, “Technical Data Sheet No. 19: Mortar for masonry – Properties and performance,” 2019. Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://mortar.org.uk/documents/miadata19.pdf>
- [145] J. Van Der Putten, D. Snoeck, R. De Coensel, G. De Schutter, and K. Van Tittelboom, “Early age shrinkage phenomena of 3D printed cementitious materials with superabsorbent polymers,” *Journal of Building Engineering*, vol. 35, p. 102059, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102059.
- [146] S. Pessoa, M. Jesus, A. S. Guimarães, S. S. Lucas, and N. Simões, “Experimental characterisation of hygrothermal properties of a 3D printed cementitious mortar,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02355, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02355.
- [147] A. Borges, I. Flores-Colen, and J. de Brito, “Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay,” *Constr Build Mater*, vol. 191, pp. 535–543, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.043.

- [148] S. Pessoa, M. Jesus, A. S. Guimarães, S. S. Lucas, and N. Simões, “Experimental characterisation of hygrothermal properties of a 3D printed cementitious mortar,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02355, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02355.
- [149] M. Jesus, J. Teixeira, A. S. Guimarães, B. Rangel, and J. L. Alves, “From 3D survey data of cultural heritage artefacts to 3D-printed prototypes based on cement and lime-based mortars,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 37, p. e00412, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.daach.2025.e00412.