

CARATERIZAÇÃO DE UMA MISTURA COMERCIAL CIMENTÍCIA PARA IMPRESSÃO 3D

GONÇALO MIGUEL FERREIRA MARTINS

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

Orientador: Doutor Fernando Pedro Fernandes Pereira

Coorientadora: Doutora Ana Sofia Guimarães Teixeira

Coorientadora: Doutora Ana Mafalda Matos

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ 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

🌐 <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 - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

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.

A jornada das mil milhas começa com um único passo

Lao Tzu

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento da presente dissertação não teria sido possível sem a colaboração de inúmeras pessoas que, cada uma na sua área, prestaram o seu apoio constante.

Quero deste modo prestar o meu sincero reconhecimento através do seguinte agradecimento:

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Pereira, pela disponibilidade, pelo apoio, e por ter influenciado os avanços semanais constantes de esta dissertação com bastante paciência. Foi um elemento fulcral para a elaboração e conclusão deste trabalho.

À Professora Doutora Ana Sofia Guimarães, por todo o conhecimento transferido relacionado com esta área de investigação e também por me dar a proximidade com uma grande equipa de trabalho.

À Doutora Ana Mafalda Matos, pela proximidade ao longo de toda a tese, pelo desafio de participação na investigação e também por toda a contribuição para esta dissertação.

À Sofia Pessoa e Manuel Jesus, que sem eles os progressos desta tese não seriam os mesmos. Foram uma verdadeira equipa de trabalho para mim quando não necessitavam de o ser. Por toda a disponibilidade quando as coisas não corriam dentro do esperado e acima de tudo pela amizade.

Ao Laboratório de Estruturas pela disponibilização de equipamentos e a todos os elementos envolvidos neste por toda a ajuda que me foi fornecida, em especial uma palavra de apreço à Paula e ao Cláudio.

Ao Laboratório de Física das Construções por todos os equipamentos que me foram permitidos utilizar e ao Engenheiro Eduardo por todos os apoios nas variadas temáticas.

À Weber pela disponibilização do material a utilizar ao longo desta dissertação.

Aos meus avós que sempre mantiveram o apoio e por todos os conhecimentos passados e educação que me transmitiram de forma a ter-me tornado o adulto que sou hoje.

À minha mãe, parceira de todas as horas, que mesmo estando longe sofreu comigo todas as peripécias ao longo desta redação e forneceu todas as ajudas e mais algumas.

Ao meu padasto, Jorge, uma enorme gratidão por todos os ensinamentos e apoio ao longo de todos estes anos.

Aos meus irmãos por toda a amizade, carinho e por me terem ajudado no desenvolvimento como pessoa

A todos os que já cá não estão, mas ao longo da vida cá estiveram e me moldaram como pessoa.

Aos colegas da faculdade, que muitos se tornaram amigos, por toda esta caminhada que foi feita em conjunto que sozinho não teria tanto interesse.

Por último, mas não menos importante, a todos os meus amigos já antigos. Uma especial palavra de apreço ao grupo de infância por nunca nos deixarmos para trás e por todos os instantes passados. Também ao grupo antigo de Leça da Palmeira por todos os grandes momentos de lazer, mas também pelas palavras e companhia em momentos mais difíceis da vida em que não duvidam em estar presentes.

RESUMO

A Indústria 4.0 tem impulsionado um grande desenvolvimento no setor da construção, sendo a impressão 3D uma das tecnologias promissoras nesse contexto. A liberdade para criar elementos de formas complexas e variáveis pode revolucionar a indústria da construção.

O trabalho atual teve como objetivo caracterizar um compósito à base de cimento disponível comercialmente para impressão 3D. A composição exata da argamassa é desconhecida e o fornecedor não pode ser revelado. No entanto, os constituintes da argamassa são CEM I 52.5, areia de quartzo <1 mm, carga de calcário, aditivos de reologia e fibras de polipropileno. A proporção água/massa de sólidos é de 0.16. As propriedades mecânicas foram avaliadas em corpos de prova moldados durante 2 a 28 dias. Além disso, foi realizado o teste de condutibilidade térmica para provetes moldados e impressos, com diferentes geometrias e parâmetros de impressão, como velocidade de impressão e altura da camada.

As propriedades mecânicas, resistência à flexão e resistência à compressão, foram avaliadas de acordo com a norma NP EN 196-1. Quanto às propriedades higrotérmicas, foram realizados testes de ação capilar e condutividade térmica, seguindo as normas ISO 15148 e ASTM D 5930, respetivamente. A trabalhabilidade do material no estado fresco foi analisada através de um ensaio de espalhamento. Foram também produzidos provetes utilizando o mesmo material e condições de mistura através de métodos tradicionais de produção, empregando cofragem, para determinar se a técnica de produção influencia as propriedades avaliadas.

A resistência à compressão aumentou de 45.85 MPa aos 2 dias para 61.46 MPa aos 28 dias, e a resistência à flexão aumentou de 9.57 MPa para 11.79 MPa ao longo do mesmo período. Em termos de condutibilidade térmica e absorção de água por capilaridade, os valores obtidos para os provetes impressos foram de 2.07 W/(m.K) e 0.00065 kg/m² s^{1/2}, respetivamente, enquanto provetes moldados apresentaram valores de 2.26 W/(m.K) e 0.0011 kg/m² s^{1/2}, respetivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D, Indústria 4.0, Técnicas de Impressão 3D, Mistura Cimentícia, Propriedades Mecânicas, Propriedades Térmicas, Comparação de Propriedade

ABSTRACT

Industry 4.0 has been driving a major development in the construction sector, with 3D printing (3DP) being one of the promising technologies in this context. The freedom to create complex and variable shapes elements can revolutionize the construction industry.

The current work aimed to characterize a commercially available cement-based composite for 3D printing. The exact composition of the mortar is unknown, and the supplier cannot be disclosed. However, the mortar constituent are CEM I 52.5, quartz sand <1 mm, limestone filler, rheology admixtures and polypropylene fibres. The water-to-solid mass ratio is 0.16. The mechanical properties were assessed from 2 to 28 days on cast specimens. In addition, the thermal conductivity test was performed for both cast and printed specimens with different geometries and printing parameters, such as printing speed and layer height.

The mechanical properties, flexural and compressive strength, were performed according to the NP EN 196-1. Regarding the hygrothermal properties, capillary action and thermal conductivity tests were conducted following the ISO 15148 and ASTM D 5930 standards, respectively. The workability of the fresh composite was analyzed through a slump test. Test specimens were also produced using the same material and mixing conditions through traditional production methods, employing formwork, to determine if the production technique influences the properties.

The compressive strength increased from 45.85 MPa at 2 days to 61.46MPa at 28 days, and the flexural strength increased from 9.57 to 11.79 MPa over the same period. In terms of thermal conductivity and capillary water absorption, the values obtained for the printed specimens were 2.07 W/(m.K) and 0.00065 kg/m² s^{1/2}, respectively, while the moulded specimens showed values of 2.26 W/(m.K) and 0.0011 kg/m² s^{1/2}, respectively.

KEYWORDS: 3D PRINTING, INDUSTRY 4.0, 3D PRINTING TECHNIQUES, 3D PRINTING IN CONSTRUCTION SECTOR, CEMENTITIOUS MATERIAL, MECHANICAL PROPERTIES, THERMAL PROPERTIES, PROPERTY COMPARISON

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
 2. ESTADO DE ARTE.....	 5
2.1 ENQUADRAMENTO.....	5
2.2 IMPRESSÃO 3D	5
2.2.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA	5
2.2.2 DEFINIÇÃO.....	8
2.2.3 MATERIAIS UTILIZADOS	9
2.2.4 TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO	11
2.2.4.1 Binder jetting processes (BJP)	11
2.2.4.2 Directed energy deposition processes (DED)	12
2.2.4.3 Extrusion-based processes (EBP)	13
2.2.4.4 Material jetting processes (MJP)	16
2.2.4.5 Powder Bed Fusion (PBF).....	17
2.2.4.6 Sheet Lamination Processes (SLP)	18
2.2.4.7 Photopolymer vat processes (PVP)	19
2.2.5 COMPARAÇÃO DE TIPOS DE IMPRESSÃO	20
2.2.6 DESAFIOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D	21
2.3 INDÚSTRIA 4.0.....	22
2.3.1 DEFINIÇÃO DE CONCEITO	22
2.3.2 INDÚSTRIA 4.0 ASSOCIADA À CONSTRUÇÃO CIVIL	23
2.4 IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO.....	24
2.4.1 IMPRESSÃO 3D DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	24
2.4.4.1 Composições comerciais	25
2.4.4.2 Composições não proprietárias.....	26

2.4.4.3 Propriedades no estado fresco	26
2.4.4.4 Caracterização mecânica	26
2.4.4.5 Caracterização higrotérmica	27
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1 ENQUADRAMENTO.....	29
3.2 ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D.....	29
3.3 FABRICO DE PROVETES	30
3.3.1 DESENHO DA PEÇA.....	30
3.3.2 CORTE DA PEÇA	31
3.3.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA	34
3.3.4 IMPRESSÃO DE PROVETES	36
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	40
3.4.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO	41
3.4.2.1 Resistência à tração.....	42
3.4.2.2 Resistência à compressão	43
3.4.3.1 Provetes utilizados	44
3.4.3.2 Condutibilidade térmica	45
3.4.3.3 Absorção de Água Por Capilaridade	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 ENQUADRAMENTO.....	49
4.2 ENSAIO DE ESPALHAMENTO	49
4.3 CARATERIZAÇÃO MECÂNICA	50
4.3.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO	50
4.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	51
4.4 CARATERIZAÇÃO HIGROTÉRMICA.....	52
4.4.1 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	52
4.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	54
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS. 59	
5.1 CONCLUSÕES	59
5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
---	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas associadas a impressão 3D retirado de (Bonnard, Hascoët, and Mognol 2019).	6
Figura 2 – Técnicas de Impressão e sua cronologia retirado de (Buswell et al. 2018).	7
Figura 3 – – Exemplos práticos de aplicação de impressão 3D – (a) Apis Cor retirado de (Sakin and Kiroglu 2017) (b) Ponte Pedonal em La Mancha retirado de (Buchanan and Gardner 2019).....	7
Figura 4 – Vantagens impressão 3D retirado de (El-Sayegh, Romdhane, and Manjikian 2020).	9
Figura 5 – Gráfico resumo da impressão 3D na construção retirado (Pessoa et al. 2021b).	10
Figura 6 – Materiais utilizados na impressão 3D de betão retirado de (Craveiro et al. 2019).	11
Figura 7 - Tecnologias de impressão 3D retirado de (Guimarães, Delgado, and Lucas 2021).	11
Figura 8 – Processo de Binder Jetting retirado de (Parupelli and Desai 2019)	12
Figura 9 – Processo de Directed Energy Deposition retirado de (Parupelli and Desai 2019)	13
Figura 10 – Representação da técnica de extrusão retirado de (Teixeira et al. 2021)	13
Figura 11 – Fused Deposition Modelling retirado de (Baich, Manogharan, and Marie 2015).	14
Figura 12 – Countour Crafting retirado de (Zhao, 2022).....	15
Figura 13 – Impressão de betão retirado de (Gosselin et al. 2016).....	15
Figura 14 – Betão impresso com reforço e espaços vazios funcionais retirado de (Nematollahi, Xia, and Sanjayan 2017)	16
Figura 15 – Material Jetting retirado de (Al-Nimry and Daghmash 2023).....	17
Figura 16 – Powder Bed Fusion retirado de (Parupelli and Desai 2019).....	18
Figura 17 – Sheet Lamination retirado de (Gibson, Rosen, Stucker, Khorasani, Gibson, et al. 2021). ..	19
Figura 18 – Photopolymer Vat retirado de (Parupelli and Desai 2019).	20
Figura 19 – Construção 4.0 retirado de (Forcael et al. 2020b)	23
Figura 20 – Exemplos de edifícios impressos em 3D retirado de (Robayo-Salazar et al. 2023).	25
Figura 21- Valores de resistência mecânica retirados de (Lesovik, 2021)	27
Figura 22 – Condutibilidade térmica para betão corrente retirado de (Talebi et al. 2020)	28
Figura 23– Condutibilidade térmica para betão de baixa densidade retirado de (Real et al. 2016)	28
Figura 24 – Esquema resumo de Impressão 3D	29
Figura 25 – Fotografia da argamassa comercial ensacada para Impressão 3D utilizada neste trabalho	30
Figura 26 – Peças pretendidas desenhadas no AutoCAD.....	31
Figura 27 – Corte da peça no Ultimaker Cura	32
Figura 28 - Misturadora utilizada e sua ficha técnica	35
Figura 29 – Preparação da Mistura para Impressão.....	35

Figura 30 – Impressora 3D Bemore3D_SMART, Área de impressão 2.5mx2.5m.x3m - 6m, camada 10mm a 50mm/30mm a 150mm: a) Fotografia (na FEUP – Laboratório de Estruturas), b) Vista esquemática.....	36
Figura 31 – Impressão 3D de provetes cilíndricos.....	37
Figura 32 – Impressão dos provetes em formato de anel.....	38
Figura 33 – Produto final proveniente da impressão 3D.....	39
Figura 34 – Fabrico de provetes com recurso a cofragem	40
Figura 35 – Ensaio de espalhamento	41
Figura 36 – Ensaio à tração por flexão	43
Figura 37 – Ensaio de Resistência à compressão.....	44
Figura 38 – Provetes utilizados para ensaios higrotérmicos.....	44
Figura 39 – Ensaio de Condutibilidade Térmica	46
Figura 40 – Absorção de água por capilaridade	48
Figura 41 – Ensaio de Espalhamento.....	49
Figura 42 – Gráfico de resistência à flexão aos 28 dias	50
Figura 43 – Gráfico de resistência à flexão.....	51
Figura 44 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias	51
Figura 45 – Gráfico resumo de resistência à compressão.....	52
Figura 46 – Gráfico de condutibilidade térmica.....	54
Figura 47 – Gráfico de ensaio de capilaridade	55
Figura 48 – Gráfico de índice de capilaridade	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela comparativa de formatos de impressão	20
Tabela 2 – Parâmetros de impressão da primeira sessão de impressão	33
Tabela 3 – Parâmetros de impressão da segunda sessão de impressão	34
Tabela 4 – Propriedades de impressão dos provetes para ensaios higrotérmico ordenados de acordo com a Figura 37	45
Tabela 5 – Dimensões e descrição dos provetes ensaiados	45
Tabela 6 – Registo de valores do ensaio de condutibilidade térmica	53
Tabela 7 – Valores resumo de ensaio de capilaridade	56
Tabela 8- Resistência à flexão aos 2 dias	65
Tabela 9 - Resistência à flexão aos 14 dias	65
Tabela 10 - Resistência à flexão aos 21 dias	65
Tabela 11 - Resistência à flexão aos 28 dias	65
Tabela 12 – Resistência à compressão aos 2 dias.....	67
Tabela 13 - Resistência à compressão aos 14 dias	67
Tabela 14 - Resistência à compressão aos 21 dias	68
Tabela 15 - Resistência à compressão aos 28 dias	68
Tabela 16 – Massa dos provetes ao longo do ensaio de capilaridade	70

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

λ - Coeficiente de condutibilidade térmica [$\text{W/m}^2\text{°K}$]

m - Metro

h – Hora

cm – Centímetros

MPa – MegaPascal

W – Watt

mm – Milímetros

N – Newton

Φ – Diâmetro

°C – Graus Celsius

DED – Directed energy deposition processes

EBP - Extrusion-based processes

MJP - Material jetting processes

CIJ – Continuous Ink Jetting

PBF - Powder Bed Fusion

SLP - Sheet Lamination Processes

PVP - Photopolymer vat processes

BIM – Building Information Modelling

3DCP – Three dimensional concrete printing (impressão 3D de betão)

AM – addicitive manufacturing (manufatura aditiva)

SLA – estereolitografia

FDM – Fused Deposition Modelling

SLS – Selective Laser Sintering

LOM – Laminated Object Manufacturing

BJP – Binder Jetting Process (processo de jato aglutinante)

3DP – three dimensional printing (impressão 3D)

EUA – Estados Unidos da América

CC – Contour Crafting

UHPC – Ultra High Performance Concrete

TU – Technical University

AI – Artificial Intelligence

STL - Standard Tessellation Language

HR – Humidade Relativa

NP – Norma Portuguesa

EN – Norma Europeia

DEC - Departamento de Engenharia Civil

1

INTRODUÇÃO**1.1. ENQUADRAMENTO**

Historicamente, a construção tem sido uma indústria intensiva em termos mão-de-obra, com baixo recurso à tecnologia, com baixa produtividade, quando comparada com outro setores, falta de inovação e conservadora, o que resultou numa estagnação nas últimas décadas (Wangler et al. 2019), (Pessoa et al. 2021a) As principais barreiras para tal estagnação deve se em parte ao elevado número de stakeholders muito fragmentados, mão de obra insuficientemente qualificada e cada vez mais escassa, pois é trabalho árduo e pesado, resultando num elevado número de acidentes de trabalho e fatalidades. Recentemente, a pandemia de COVID-19 teve profundas consequências no mercado laboral. No início de 2020, a indústria da construção foi severamente afetada pela estagnação de obras, escassez de materiais e problemas múltiplos na cadeia de suprimentos e projetos suspensos.

Não obstante, a digitalização da construção, nomeadamente o método de construção de impressão 3D, ganhou relevância devido ao potencial para lidar com a pandemia (Commission 2021) e, mais recentemente, com a crise da guerra (Ikiz 2021). De acordo com as previsões de Markets and Markets, os métodos de construção de impressão 3D podem diminuir o a geração de resíduos em cerca de 30 a 60% e o tempo de construção em 50 a 70%. De facto, o uso da tecnologia de impressão 3D na indústria da construção pode reduzir a necessidade de mão de obra no local, uma vez que o processamento contínuo do projeto é feito por controle remoto por meio de ferramentas BIM e Inteligência Artificial. Portanto, além de aumentar a produtividade, a impressão 3D na construção pode criar empregos mais tecnológicos e menos pesados fisicamente resolvendo as limitações existentes de mão de obra nesta indústria.

A tecnologia de impressão 3D mais difundida na indústria da construção é a impressão 3D de materiais cimentícios (3DCP), geralmente argamassas. Os elementos de construção são projetados recorrendo a ferramentas computacionais comuns e depois extrudidos no local ou em ambiente de prefabricação com recurso a uma impressora 3D que fabrica um objeto físico depositando camadas sucessivas automaticamente. A impressão 3D não requer cofragens e/ou estruturas provisórias, que são responsáveis por uma quantidade considerável de geração de resíduos (cerca de 23% do total) (Şahin and Mardani-Aghabaglou 2022),(Camacho et al. 2018), consumo de materiais, tempo e custos de mão de obra (de 35 a 60% de custos globais (Pan and Zhang 2021). Além disso, impressão 3D permite mais liberdade arquitetónica devido à não necessidade de cofragem Lowke et al. 2018. O potencial do 3DCP parece enorme, e a sua implementação é cada vez mais uma realidade, capaz de revolucionar a indústria da construção.

No contexto da revolução industrial que tem existido ao longo das últimas décadas foram emergindo certas tecnologias que tentam atingir as metas principais deste novo tipo de indústria, denominada como Indústria 4.0. Dentro de todas as existentes, podem-se definir quatro metodologias essenciais associadas a este conceito evolutivo industrial, sendo que a impressão 3D uma delas (Forcael et al. 2020a).

Mas como todas as outras práticas recentes e emergentes, a impressão 3D terá de ultrapassar os desafios sociais, tecnológicos, culturais e económicos atuais de forma a conseguir corresponder a todas as necessidades e possíveis oportunidades que surgem no setor da construção (De Schutter et al. 2018). De forma a ser possível compreender e verificar a aplicabilidade dos materiais provenientes deste tipo de sistema construtivo, para cada tipo de aplicação diferente, deverá ser efetuada uma avaliação cumprindo com os mesmos requisitos aos quais os materiais mais correntes expostos. Requisitos estes que são avaliados através de ensaios efetuados com o objetivo de retirar as caraterísticas físicas e mecânicas do material extrudido em 3D.

1.2. OBJETIVOS

O aparecimento de misturas comerciais de base cimentícia para impressão 3D já é uma realidade, sendo fundamental que a par do surgimento destes materiais comerciais seja também realizado um acompanhamento de estudo, análise e caracterização. Nesse sentido, os trabalhos de investigação, como o que se apresenta nesta dissertação, são importantes para o aumento do conhecimento sobre o seu comportamento. Deste modo, este trabalho tem como objetivo caracterizar o compósito cimentício comercial ao nível de propriedades mecânicas e higrótérmicas. Adicionalmente será verificada a influência da técnica impressão 3D nas propriedades térmicas. Para tal serão comparados provetes impressões e moldados de forma tradicional (cofragem). Dentro da técnica de impressão 3D são avaliados diferentes parâmetros, nomeadamente velocidade de impressão, espessuras das camadas. Para alcançar estes objetivos principais, foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação das resistências mecânicas de provetes moldados;
- Determinação da condutibilidade térmica de provetes moldados e impressos;
- Determinar a absorção de água por capilaridade de provetes moldados e impressos;

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento divide-se em 5 capítulos que abordam os seguintes conteúdos:

- No capítulo presente, faz-se uma breve introdução ao trabalho realizado e define-se com clareza os objetivos que se pretendem alcançar.
- No capítulo 2 pode encontrar-se uma pesquisa relativa ao estado da arte do tema em questão, que toca em diversas especificidades do trabalho que se irá desenvolver, começando pelos conceitos que definem a impressão 3D e suas tecnologias de impressão. Em seguida será analisada a vertente da Indústria 4.0 associada a construção civil. Por fim foi necessário relacionar a temática de impressão 3D com a área da construção civil fazendo também uma análise de propriedades dos materiais e misturas já existentes.
- No capítulo 3, apresenta-se o programa experimental, em que se explicam todos os procedimentos a seguir em cada um dos ensaios, incluindo materiais e equipamentos a utilizar em todas as fases de cada um deles efetuados no material em questão, tendo este ponto como objetivo dar a compreender toda a metodologia dos trabalhos efetuado.
- O capítulo 4 retrata a análise e discussão de resultados. Os valores de interesse são colocados lado a lado, com o objetivo de se poder analisar as caraterísticas dos materiais de uma forma comparativa para que facilite a comparação e compreensão das propriedades que se estão a estudar.

- Por fim, na conclusão serão avaliados os valores obtidos e retiradas conclusões relativas ao material e também possíveis desenvolvimentos futuros para este tipo de materiais e técnicas que não tenham sido utilizados neste trabalho.

2

ESTADO DE ARTE

2.1 ENQUADRAMENTO

De forma a fazer uma análise detalhada ao material em questão, deverá ser necessário identificar, primeiramente, o seu estado de arte atual de forma a ser possível compreender em que ponto de situação se encontra. Será importante verificar o trajeto que a inovação nesse ramo está a levar com o intuito melhorar as suas propriedades e/ou caraterísticas de forma a garantir a otimização deste tipo de materiais. Para isto serão analisados três tópicos associadas à Engenharia Civil, o tema da Indústria 4.0, de uma perspetiva mais geral e a Impressão 3D, analisado com mais detalhe, e a ligação existente entre ambos os tópicos. O ramo da impressão 3D era uma vertente da construção civil que até há bem pouco tempo não era estudada e que nos últimos anos se tem tornado uma prática com grande potencial evolutivo e com uma variedade de vantagens associadas a várias áreas da Construção

2.2 IMPRESSÃO 3D

De forma a ser possível compreender o tema de impressão 3D ou manufatura aditiva (AM) e o seu estado atual na Engenharia Civil, neste tópico será feita uma abordagem histórica acerca do tema. Em seguida, serão abordados os materiais impressos utilizados na atualidade e exemplos de utilizações na construção civil. Seguidamente, com um caráter mais aprofundado, é efetuada uma pesquisa relativamente aos tipos de impressão existentes e suas diferenças. Por último é feita uma análise comparativa de propriedades dos materiais impressos por extrusão e os materiais efetuados por processos tradicionais.

2.2.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Relativamente a técnicas associadas ao espectro global de materiais, a primeira impressora 3D foi criada em 1984 quando Chuck Hull fundou a técnica de estereolitografia (SLA), nascendo também o formato STL que é o formato ainda usado atualmente. O seu primeiro objeto impresso em 3D foi um copo com 5cm de altura, que demorou meses a sua produção (Savini and Savini 2015). Em seguida, ao longo da década de 1990, foram criadas outras técnicas, sendo exemplos disso as técnicas de Fused Deposition Modelling (FDM), Sintetização Seletiva a Laser (SLS) e Laminated Object Manufacturing (LOM).

Durante esta fase inicial até início dos anos 2000, as impressoras 3D não eram abundantemente utilizadas devido ao seu elevado custo. Posteriormente, até ao ano de 2005, passou a ser objetivo a criação de máquinas de menor custo de forma a ser possível a implementação desta prática nos vários setores produtivos. Também começaram a ser criados novos métodos de impressão como o Countour Crafting, no qual é efetuada a impressão do contorno da forma pretendida.

A nível multidisciplinar, a impressão 3D conseguiu proporcionar grandes feitos, sendo alguns exemplos, ao nível da medicina, a impressão do primeiro rim funcional em 2002, e da primeira perna robótica em 2008 e para produção de vasos sanguíneos. Também em veículos foi utilizada esta técnica sendo impressa a primeira aeronave em 2011, e a primeira carroçaria de um carro em 2011. Por último existem também exemplos de aplicação ao nível de outras áreas como alimentar, moda, joalharia, construção, entre outras, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** (Gardan 2016).

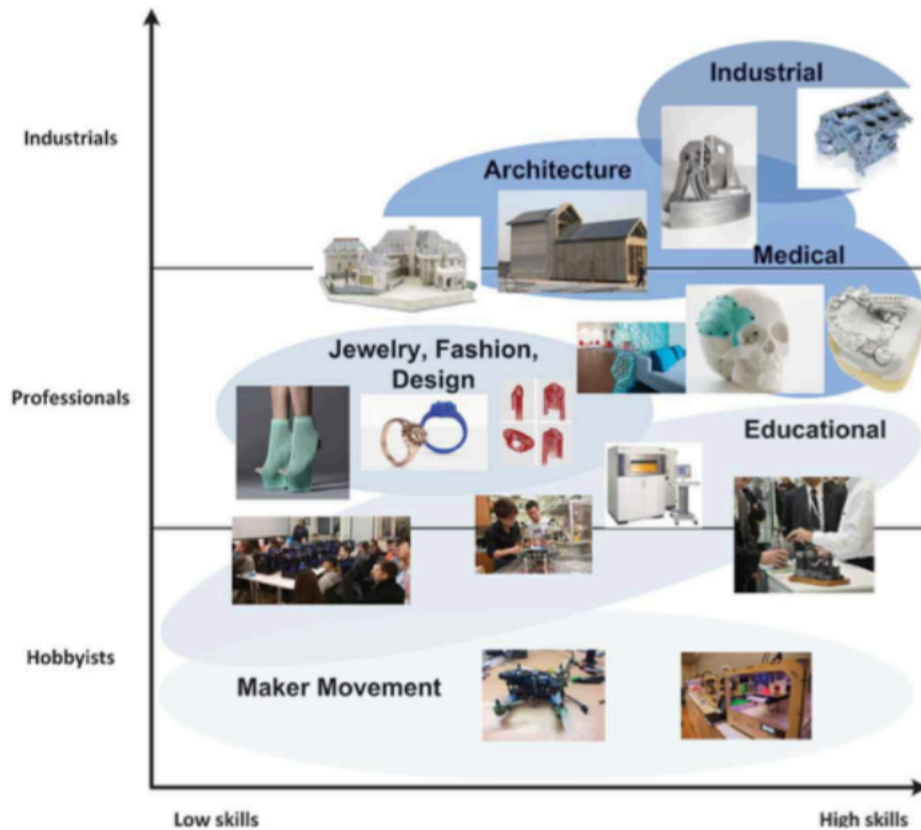


Figura 1 – Áreas associadas a impressão 3D retirado de (Bonnard, Hascoët, and Mognol 2019).

De forma resumida apresenta-se em formato de gráfico a representação da evolução no tempo da impressão 3D na construção na Figura 2.

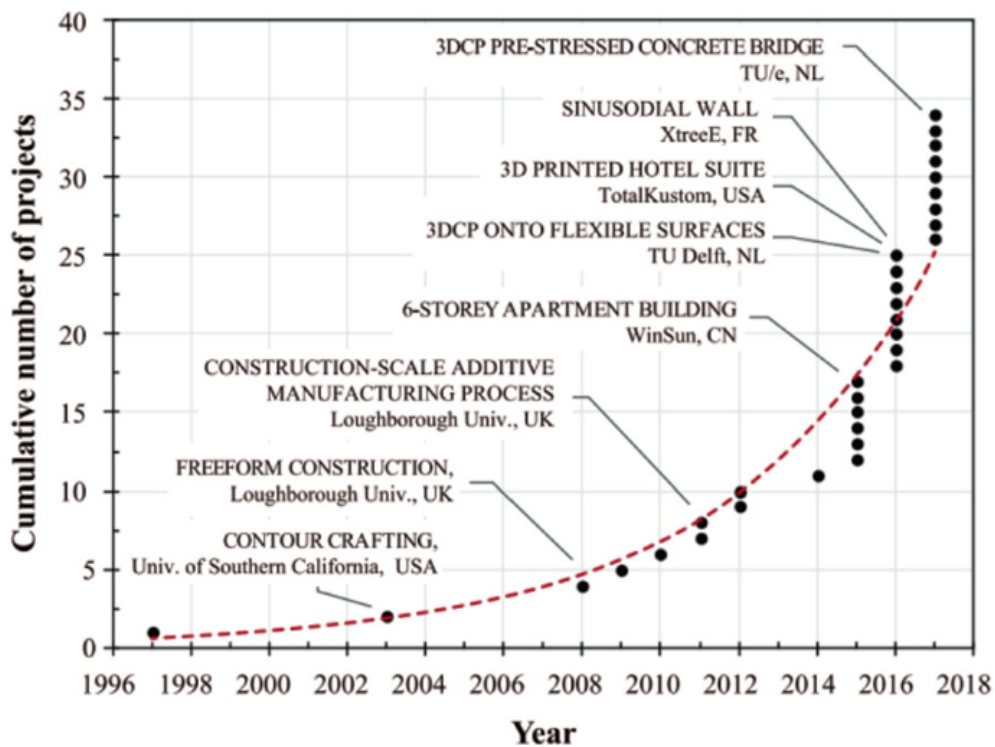


Figura 2 – Técnicas de Impressão e sua cronologia retirado de (Buswell et al. 2018)

Seguindo todo este processo evolutivo foi possível associar a impressão 3D à construção, como foi dito anteriormente, possibilitando a aplicação de um novo leque de alternativas para esta área, tendo sido o primeiro edifício construído através desta tecnologia construtiva em 2014 (Venkata Siva Rama Prasad 2022). Sendo alguns exemplos da aplicação desta técnica um edifício de escritórios no Dubai com 640 m², impresso pela empresa Apis Cor em 2019 (Figura 3a), uma ponte pedonal em Madrid com 12 metros de comprimento construída em 2016 por uma Universidade na Holanda (Figura 3b), e em Pequim que foram construídas dez casas em apenas 24h.



(a)



(b)

Figura 3 – Exemplos práticos de aplicação de impressão 3D – (a) Apis Cor retirado de (Sakin and Kiroglu 2017) (b) Ponte Pedonal em La Mancha retirado de (Buchanan and Gardner 2019)

O setor da construção ainda é considerado um setor tradicional, relativamente às técnicas utilizadas nos seus processos construtivos, mas ultimamente temos visto um aumento da competitividade no setor e o desenvolvimento de novos materiais, será possível obter novos benefícios e também atingir maior grau de flexibilidade relativamente às geometrias e tempos de construção (Zahabizadeh et al. 2019).

2.2.2 DEFINIÇÃO

Após todo o trajeto evolutivo associado a esta tecnologia, consegue-se agora definir a manufatura aditiva (AM) como o processo de criação de um objeto físico com base num modelo digital. Esta produção baseia-se na adição de um ou vários componentes camada a camada, podendo utilizar uma variedade imensa de materiais e técnicas.

Os benefícios tecnológicos da impressão 3D são muitos, como economia em termos de peso próprio da estrutura, tempo, minimização de resíduos. Além disso, a produção de materiais utilizando impressão 3D com recursos aprimorados ajuda a reduzir o desperdício de matéria-prima durante o processo de construção. A impressão 3D, se usada em larga escala, ajudaria as indústrias a implementar o conceito de Indústria 4.0 (Malik et al. 2022). Apesar da diversidade de categorias de processamento de AM, explicada mais tarde, a mais frequentemente associada ao 3DP é a extrusão de material, em que um modelo digital 3D predefinido é analisado e, através de uma sucessão de camadas transversais, é traduzido num caminho de impressão, onde as camadas são impressas de baixo para cima. A extrusão de materiais é essencialmente uma implementação em larga escala da Fused Deposition Modelling (FDM), um processo de fabricação massivamente disseminado ao ponto de ser frequentemente visto em impressoras 3D de pequenas dimensões. De forma a avaliar todas estas possibilidades existentes associadas a esta técnica, em seguida apresentam-se os tópicos com interesse associado a esta temática de forma a compreender onde estará o potencial de otimizar a produtividade da indústria nas próximas décadas, tendo em conta o seu possível desenvolvimento exponencial nos últimos 10 anos. (Ahmed 2023)

Em termos de benefícios a impressão 3D na construção também demonstra uma grande variedade sendo resumidos na Figura 4, vantagens essas que conseguem levar à sustentabilidade na indústria da construção (El-Sayegh, Romdhane, and Manjikian 2020).

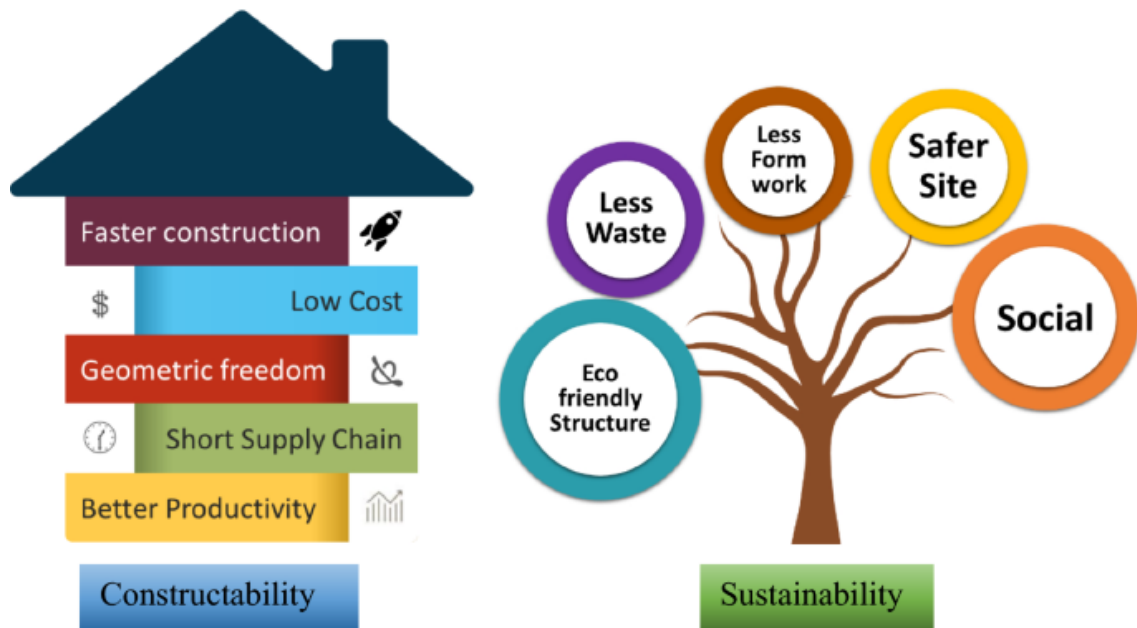


Figura 4 – Vantagens impressão 3D retirado de (El-Sayegh, Romdhane, and Manjikian 2020)

2.2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Como o mercado de impressão 3D está a aumentar progressivamente, o seu domínio de aplicações também está a expandir-se. Inicialmente, a impressão 3D foi usada no setor automóvel, mas à medida que a tecnologia evoluiu, a sua aplicação também se espalhou para as indústrias aeroespacial, de construção, alimentar, da medicina, da moda e eletrônica, entre outras.

Novos materiais avançados de impressão 3D estão a ser desenvolvidos para aplicações específicas, com o objetivo de se melhorar esta tecnologia. Devido a multiplicidade de áreas que esta técnica tem potencial de abranger, têm sido efetuados nos últimos anos diversos estudos e pesquisas de forma a ser possível conferir as propriedades mais adequadas aos materiais impressos, tendo-se concluído que um dos principais desafios da impressão 3D, usando extrusão, é equilibrar adequadamente as propriedades reológicas e mecânicas das misturas imprimíveis, principalmente nos materiais de construção como o betão. No desenvolvimento de novos materiais o foco é melhorar a capacidade de impressão sem comprometer as suas propriedades mecânicas. Nesse contexto (Malik et al. 2022) definiu em cinco os principais materiais para a impressão 3D:

- Materiais inteligentes;
- Materiais cerâmicos;
- Materiais compostos;
- Biomateriais;
- Materiais eletrônicos.

De uma perspetiva geral, ao fabricar aditivamente um determinado componente ou estrutura, o material utilizado deve ser compatível com o processo 3DP aplicado, através do qual é impressa uma forma específica concebida para cumprir uma determinada função. No caso da indústria da construção, é essencial que os elementos estruturais estejam em conformidade com o código de construção, pelo que as misturas de impressão devem apresentar propriedades mecânicas adequadas (resistência à compressão, tração e à flexão). Por outro lado, é fundamental levar em consideração características como o tamanho, a geometria e a altura da camada.

Relativamente ao setor da construção as argamassas à base de cimento são o material mais utilizado na construção 3DP. No entanto, misturas-padrão com grandes quantidades de agregados grossos, não passam pelo bico de extrusão, por este ser demasiado estreitos para o tamanho desses agregados. Para superar esta limitação, a composição de tais argamassas geralmente apresenta, juntamente com cimento e água, uma grande proporção de agregados finos, que com uma distribuição de partículas adequada, conferem a resistência mecânica adequada. Estão também presentes outros aditivos e misturas, adicionados como forma de controlar e otimizar as propriedades específicas da mistura, quer no seu estado fresco e/ou endurecido. Apresenta-se de forma resumida na Figura 5 todos os parâmetros envolvidos na impressão 3D na construção.

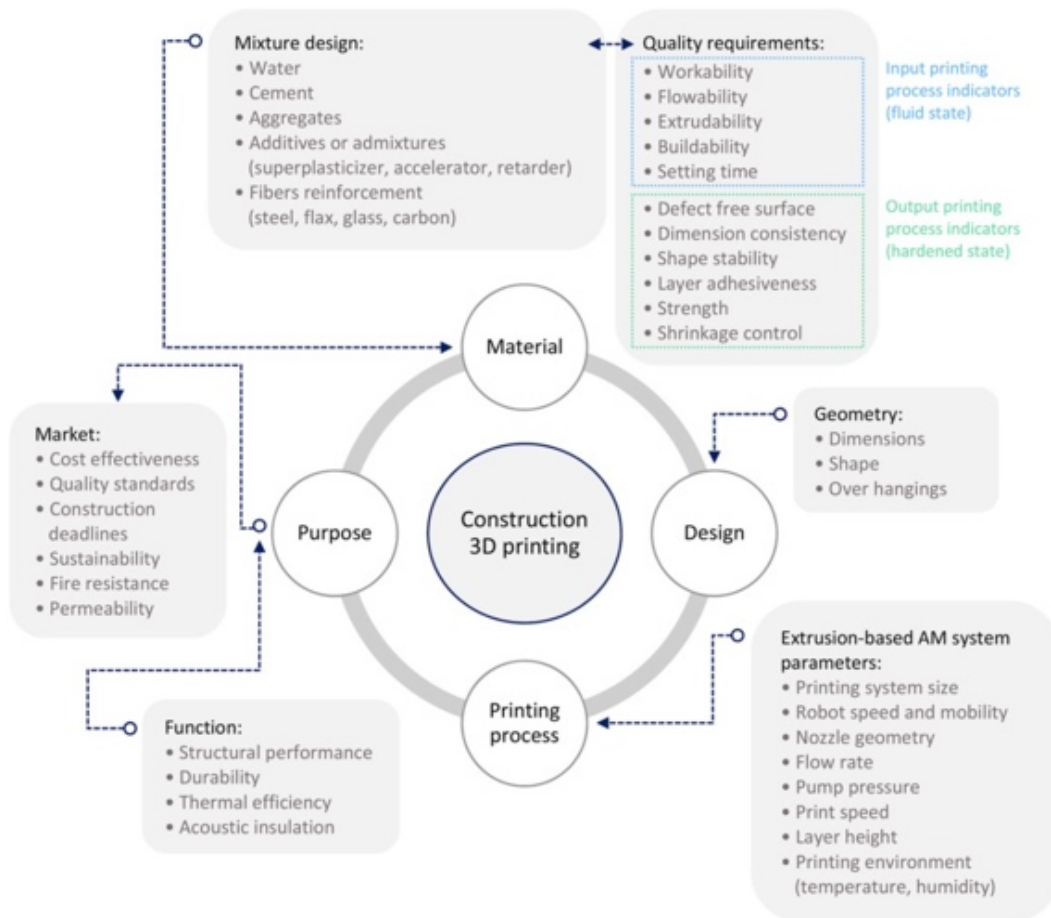


Figura 5 – Gráfico resumo da impressão 3D na construção retirado (Pessoa et al. 2021b).

A velocidade de impressão selecionada é função do tamanho e complexidade geométrica do elemento a imprimir, ligada à velocidade da bomba e à qualidade do material de betão extrudido. Uma vez que o processo de impressão requer um alto e contínuo grau de controlo do material durante a impressão, os materiais de construção de alto desempenho são os mais pretendidos.

Na Terra, quaisquer oportunidades para reduzir as emissões de CO₂, incluindo a utilização de outros materiais que não o clínquer Portland ou os materiais residuais, podem ter enormes impactos ambientais. Tintas à base de pó feitas de materiais residuais de construção, formulações de polímero de cimento Portland sem óxido de ferro, misturas de óxido de magnésio, e betão à base de enxofre já foram formuladas e utilizadas na impressão de protótipos. São exemplos de possíveis componentes do betão para impressão 3D os apresentados na Figura 6

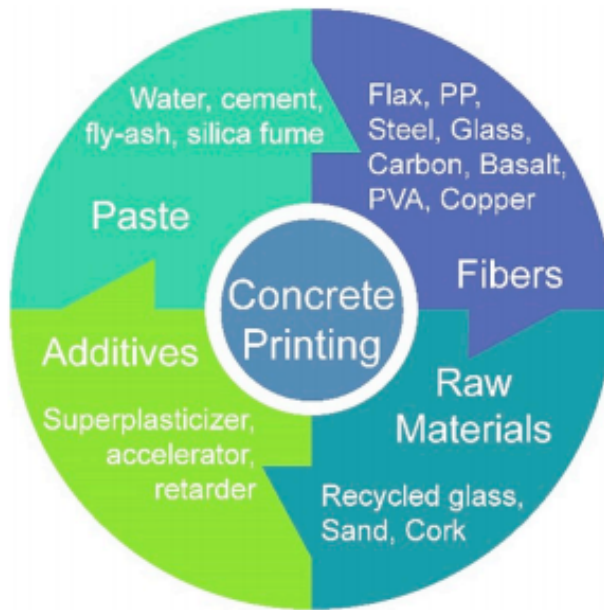


Figura 6 – Materiais utilizados na impressão 3D de betão retirado de (Craveiro et al. 2019).

2.2.4 TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO

Analisando de forma concreta os tipos de impressão existentes associados ao seu formato de fabricação e eventuais fontes de energia necessárias e, tentando esclarecer qual o seu modo de funcionamento, apresenta-se na Figura 7 (Guimarães, Delgado, and Lucas 2021) que tem como objetivo oferecer uma visão resumida dos tipos de impressão existentes que serão expostos em detalhe nos tópicos seguintes. A cada técnica de impressão estão associados os materiais mais utilizados (Gibson, Rosen, Stucker, Khorasani, Rosen, et al. 2021).

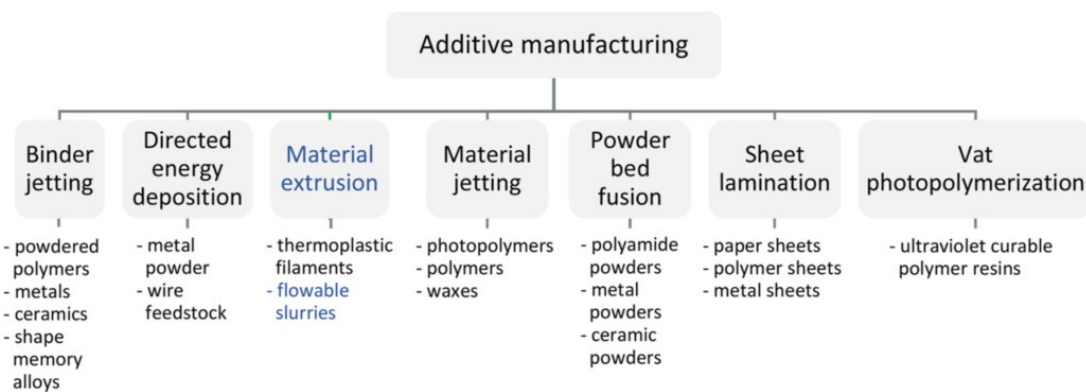


Figura 7 - Tecnologias de impressão 3D retirado de (Guimarães, Delgado, and Lucas 2021)

2.2.4.1 Binder jetting processes (BJP)

Os processos de jato de aglutinante (BJP) têm princípios semelhantes ao processo de jato de tinta de material, mas com base em bicos que depositam gotículas de um material aglutinante à base de água sobre a superfície de um leito de pó. Os possíveis materiais usados como pó incluem cerâmicas, metais, ligas com memória de forma e polímeros. Vaezi et al. (2013) descobriu que a técnica BJP fornece melhor capacidade de controle de qualidade para fabricações de cerâmica e metal a serem produzidas em comparação com a técnica de Material Jetting (MJP) que será

abordada mais a frente. No entanto, uma peça impressa em BJP tende a ter menor precisão e acabamento superficial do que a peça feita por MJP. Além disso, processos de infiltração são normalmente necessários para fabricar peças densas ou para garantir boas propriedades mecânicas (Gibson, Rosen, Stucker, Khorasani, Rosen, et al. 2021). Em resumo, o BJP avançou bastante nas fabricações de cerâmica e metal em comparação com outras técnicas porque o BJP pode fabricar materiais de alto ponto de fusão a baixa temperatura usando aglutinante e pós-tratamento. Os principais problemas durante o processo de impressão foram o desempenho da interação entre o aglutinante e o pó, a precisão acumulativa da espessura da camada depositada, a colocação das gotas, o tempo de atraso na aplicação de uma nova camada e a alteração dimensional durante o pós-tratamento. Todos os componentes deste formato de impressão apresentam-se na figura Figura 8.

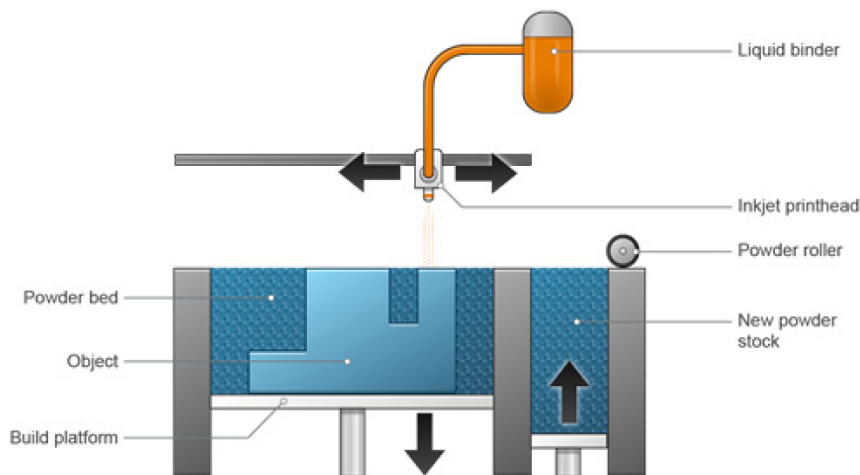


Figura 8 – Processo de Binder Jetting retirado de (Parupelli and Desai 2019)

2.2.4.2 Directed energy deposition processes (DED)

Os processos de deposição de energia direcionada (DED) usam um feixe de laser para fundir materiais (por exemplo, pó de metal e matéria-prima de arame) entregues a partir de uma cabeça de deposição de material e substrato onde os materiais são depositados (Vaezi et al. 2013). Apresenta-se de forma esquemática na Figura 9 esta forma de impressão de material.

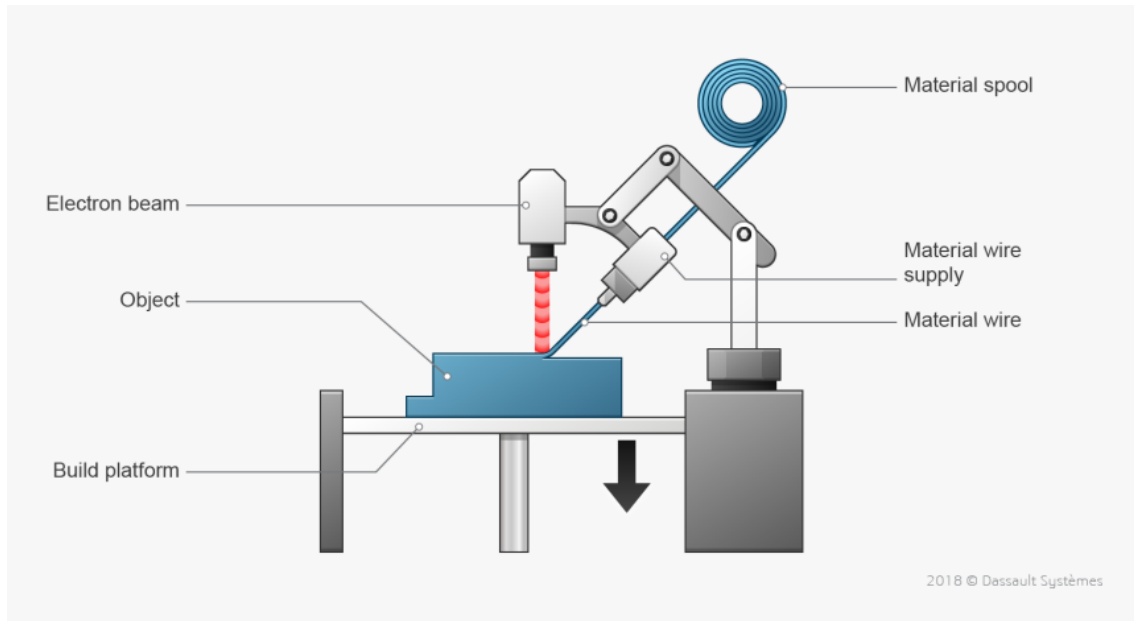


Figura 9 – Processo de Directed Energy Deposition retirado de (Parupelli and Desai 2019)

2.2.4.3 Extrusion-based processes (EBP)

Os processos baseados em extrusão são dos mais utilizados na Engenharia Civil e, devido a isso, terão uma análise mais detalhada. O seu formato geral de impressão é baseado no processo apresentado Figura 10. Estes processos possuem conceitos técnicos diversos, mas são classificados em dois grupos principais: extrusão baseada em fusão e extrusão baseada em não fusão ([Alfattni 2022](#)). O 3D-bioplotting é a mais representativa das técnicas de extrusão não baseadas na fusão e Fused Deposition Modeling (FDM) em técnicas de extrusão à base de fusão.

Neste tópico serão abordadas algumas das técnicas que mais se associam à área da engenharia civil.

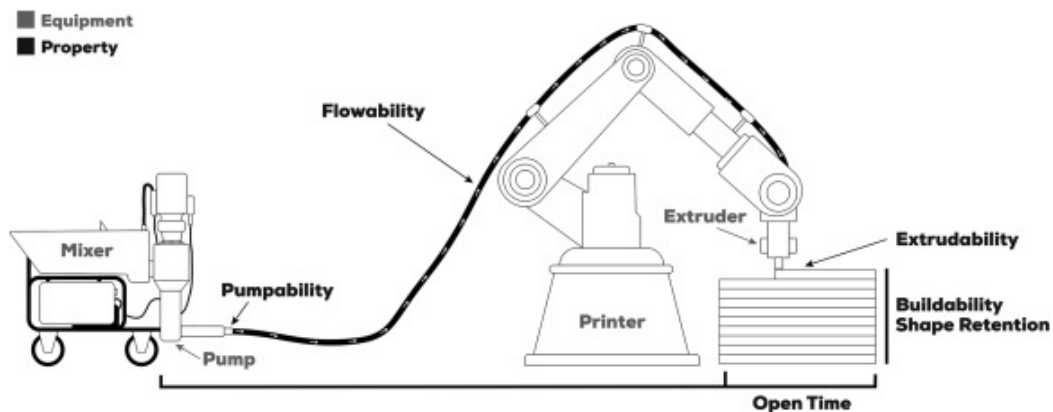


Figura 10 – Representação da técnica de extrusão retirado de (Teixeira et al. 2021)

- Fused Deposition Modeling (FDM)

Na técnica FDM, existem dois tipos de métodos de deposição usados principalmente: contorno e “raster”. No método de contorno, o caminho de extrusão segue o contorno externo e o deslocamento até preencher todo o domínio. A principal desvantagem desta técnica é a operação de impressão lenta devido à criação de caminhos múltiplos. No método “raster”, o material é depositado em zig-zag. O método “raster” é um processo mais rápido, mas menos preciso e dá

origem a vazios no processo de deposição em comparação com o contorno. Isso pode levar à detioração das propriedades no plano da estrutura. É apresentado esquematicamente se na Figura 11 o método apresentado neste tópico

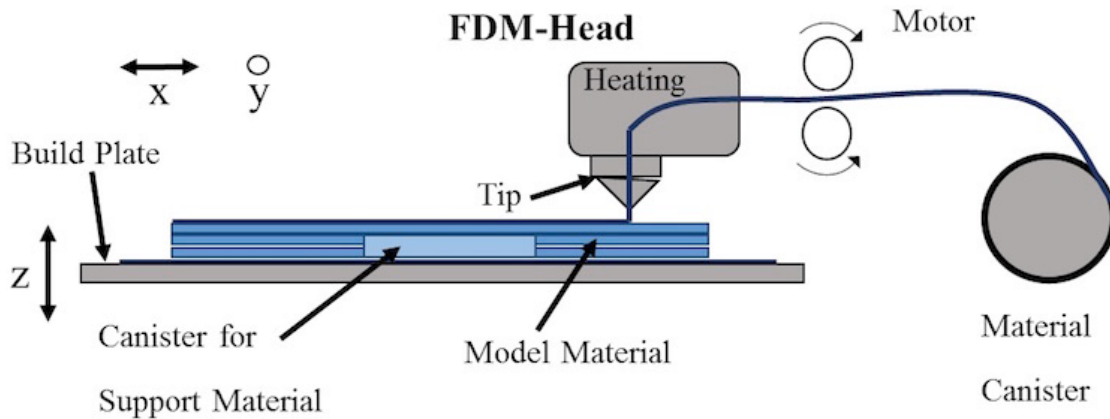


Figura 11 – Fused Deposition Modelling retirado de (Baich, Manogharan, and Marie 2015)

- Contour Crafting (CC)

A Universidade da Califórnia do Sul nos EUA, criou a tecnologia Contour Crafting (CC). Este equipamento utiliza a técnica de extrusão para extrudir uma forma vertical de betão por duas camadas de mistura de cimento. Laços de reforço construídos manualmente são colocados (horizontalmente e verticalmente a cada 30 e 13 cm), enquanto o dispositivo está a extrudir as camadas constantemente. Superfícies suavemente extrudidas são conectadas ao cabeçote de impressão. Depois de terminar a forma extrudida, o betão é pulverizado manualmente a 13 cm de altura e após uma hora, o primeiro lote é pulverizado, com um segundo lote e a pressão lateral do betão pode ser controlada permitindo um lote de uma hora para curar e solidificar parcialmente. A máquina CC cria uma forma de parede de betão.

Contour Crafting (CC) foi criado pelo Dr. Behrokh Khoshnevis em 2004 com o objetivo de otimização na construção com materiais à base de cimento, com foco na rápida construção de casas em todo o mundo e redução de custos e resíduos (Khoshnevis 2004). Este processo de construção automática baseia-se na extrusão de um material à base de cimento, onde o sistema de pórtico faz com que o bico de impressão se mova ao longo das direções X e Z, enquanto duas estruturas deslizantes paralelas permitem o movimento do bico ao longo da direção Y. O método de extrusão é híbrido: as bordas externas (aros) são construídas primeiro, seguidas pelo preenchimento da área entre as bordas opostas com um material de enchimento (como betão). Durante a fase de extrusão, duas espátulas fixadas ao bico de impressão permitem a criação de superfícies lisas e precisas como apresentado na Figura 12 (Khoshnevis 2004).

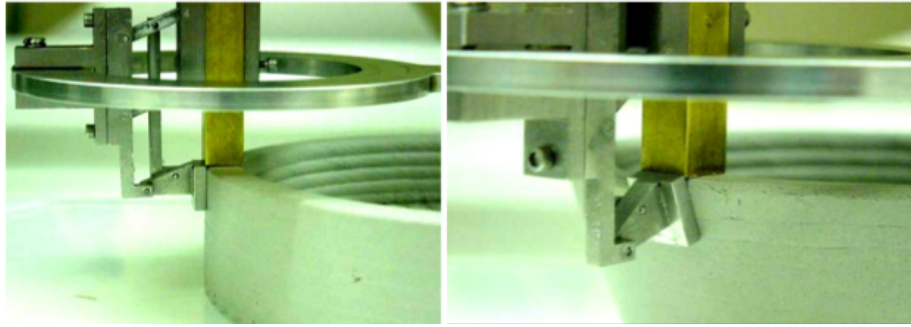


Figura 12 – Countour Crafting retirado de (Zhao, 2022)

- Concrete Printing Method

Uma equipa da Universidade de Loughborough, no Reino Unido, desenvolveu a tecnologia de impressão de betão. A tecnologia baseia-se em extrusão e está relacionada com a tecnologia CC de certo modo. O método de impressão 3D criado, no entanto, mantém a mobilidade 3D e reduz a resolução de deposição, permitindo maior flexibilidade da geometria interna e externa Figura 13. Além disso, o material usado para impressão é betão reforçado com fibra, de alto desempenho e agregados finos com qualidades de material superiores às obtidas com a técnica CC. Uma bancada em escala real produzida com impressão em betão é mostrada na figura abaixo. O banco também mostra uma técnica de reforço em que a forma de vazio devidamente selecionada conduz para o posicionamento pós-reforço (Figura 13) (Guimarães, Delgado, and Lucas 2021).

Por outro lado, tem também evoluído técnicas de impressão de betão que conseguem conferir “high performance” relativamente as suas propriedades e também conferir a possibilidade de impressão em obra. A primeira criada em França, em que uma equipa de investigação pôde oferecer um novo método com Ultra High-Performance Concrete (UHPC) associado a forma absorvente que nos espaços vazios poderão ser preenchidos com materiais isolantes como por exemplo térmicos, ou até por cabos elétricos ou saneamento (Figura 14). A segunda técnica, desenvolvida pela Universidade Técnica (TU) de Dresden na Alemanha, tem como principal funcionalidade a sua alta liberdade geométrica acrescido de melhorias ao nível de tempo trabalho e eficiência em recursos tornando assim o processo ainda mais rentável.



Figura 13 – Impressão de betão retirado de (Gosselin et al. 2016)

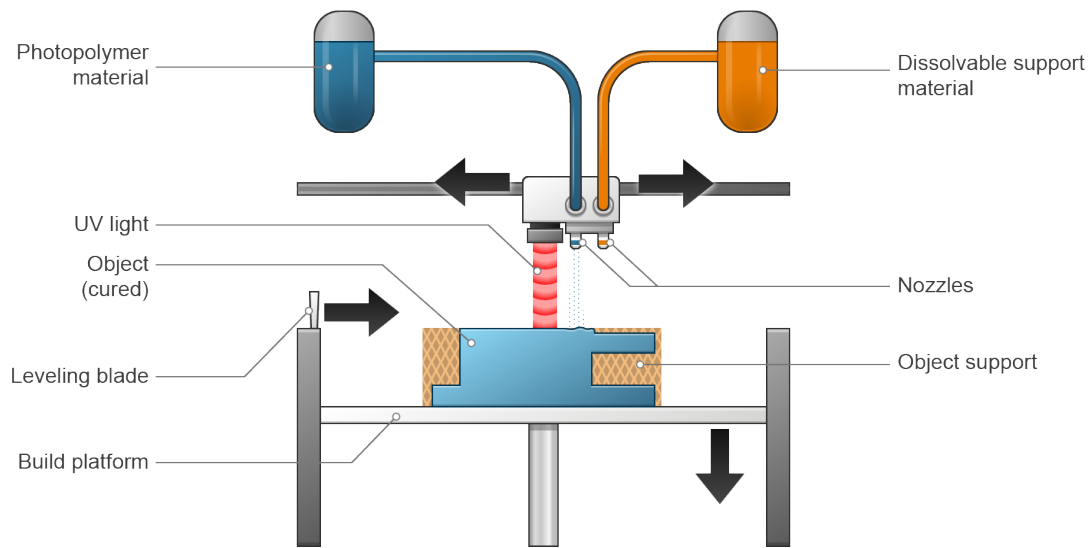


Figura 14 – Betão impresso com reforço e espaços vazios funcionais retirado de (Nematollahi, Xia, and Sanjayan 2017)

2.2.4.4 Material jetting processes (MJP)

Material jetting processes (MJP) baseiam-se no uso da técnica de impressão a jato de tinta para depositar gotículas de uma forma seletiva, através de um bico ou orifício para construir uma estrutura 3D. Esta gotícula é um líquido que é expelido para fora do bico e torna-se sólido após o depósito através de refrigeração ou cura ultravioleta (UV). Existem dois métodos para criar gotículas de material apropriadas: “drop on demand” (DoD) e jato de tinta contínuo (CIJ). Este último utiliza fluidos de baixa viscosidade e alta velocidade de queda para velocidade de impressão rápida. Em contraste, o primeiro usa gotículas menores e velocidade para alta precisão dimensional; portanto, o DoD tem um maior potencial de micro fabricação (Vaezi et al. 2013).

Nos últimos anos, tem havido uma propensão para transformar a tecnologia de impressão a jato de tinta numa ferramenta que pode ser usada em diferentes processos de fabricação, como solda microeletrônica ou fabricação de componentes microscópicos usando resinas foto curáveis. Além disso, a tecnologia de impressão a jato de tinta tem sido usada como uma técnica robusta de jato de material para fabricar estruturas 3D complexas por meio de um processo de camada por camada. Nos processos de jato de materiais, o material líquido (na forma de uma gota) é ejetado e geralmente torna-se sólido após a deposição por meio de arrefecimento (por exemplo, por cristalização ou vitrificação), alterações químicas (por exemplo, através da reticulação de um polímero) ou evaporação do solvente (Vaezi et al. 2013). Apresenta-se em formato de esquema na Figura 15 as componentes pertencentes a este formato de impressão.



2018 © Dassault Systèmes

Figura 15 – Material Jetting retirado de (Al-Nimry and Daghmash 2023)

2.2.4.5 Powder Bed Fusion (PBF)

A maioria dos processos no sistema de Power Bed Fusion (PBF), apresentado de forma esquemática o seu formato geral na Figura 16. Este sistema de impressão utiliza uma alta fonte de energia térmica para fundir materiais à base de pó (ou seja, polímero, metal e cerâmica) em estruturas e formas desejadas (Rouf et al. 2022). Nos processos PBF, três técnicas diferentes foram desenvolvidas:

- a fusão seletiva a laser (SLM), que usa fusão total em pós que se transferem para partes homogêneas;
- a técnica de sintetização seletiva a laser (SLS), que usa fusão parcial para fundir pós;
- a fusão por feixe de elétrons (EBM), que usa um conjunto de elétrons para fundir apenas pós metálicos em ambiente de vácuo.

Para aplicações médicas, a técnica SLS é amplamente utilizada para reconstrução de esqueletos ou órgãos humanos devido à sua alta precisão e repetibilidade quando comparada às técnicas de impressão FDM, LOM e jato de tinta.

- Fusão Seletiva a Laser (SLM) – o sistema começa pela aplicação de uma fina camada de material em pó espalhada por um rolo na plataforma de construção. Um forte feixe de laser funde o pó exatamente nos pontos definidos pelos dados de projeto de componentes gerados por computador. A plataforma é então rebaixada e outra camada de pó é aplicada, novamente o material é fundido para se juntar com a camada abaixo nos pontos predefinidos. Durante o processo, sucessivas camadas de pó metálico são completamente derretidas e consolidadas umas sobre as outras. Hoje, os fabricantes de impressoras 3D propõem máquinas com tecnologia laser dupla ou múltipla com camadas de 75 a 150 μm de espessura. Os tipos de materiais que podem ser processados incluem aço, aço inoxidável, cromo cobalto, titânio e alumínio.
- Sintetização Seletiva a Laser (SLS) usa um laser de alta potência para fundir pequenas partículas (aço, titânio, ligas, pós cerâmicos, etc). O SLS foi inventado pelo Dr. Carl Robert Deckard em 1988. Como o SLM, o leito de pó é rebaixado e uma nova camada de pó é aplicada por cima e o processo é repetido até que o modelo esteja completo.

Mas o que diferencia a sinterização da fusão é que os processos de sinterização não derretem totalmente o pó, mas o aquecem até ao ponto em que o pó se pode fundir a nível molecular (Ibrahim et al. 2009).

- Direct Metal Laser Sintering (DMLS) é, de certo modo, semelhante ao SLS mas com umas ligeiras diferenças. Esta tecnologia é um processo de fusão em leito de pó, que derrete o pó de metal localmente usando o feixe de laser. Um produto é fabricado camada por camada ao longo do eixo Z e o pó é depositado por meio de um raspador que se move no plano XY. DMLS geralmente refere-se ao processo aplicado a ligas metálicas para a fabricação de peças diretas na indústria, incluindo aeroespacial, médica e outras indústrias que possuem peças de tamanho pequeno a médio e altamente complexas e a indústria de ferramentas para fazer pastilhas de ferramentas diretas. A fabricação rápida de peças pelo processo DMLS requer o uso de um pó, que é composto por dois tipos de partículas. Um tipo tem um ponto de fusão baixo e o outro um ponto de fusão alto. As partículas de alto ponto de fusão geram uma matriz sólida, enquanto as partículas com baixo ponto de fusão ligam-se à matriz após serem fundidas pela entrada de energia do laser (Anand and Das 2021).

Foi descoberto que a distribuição uniforme da temperatura dos campos durante os processos de impressão leva a uma melhor qualidade; é necessário fornecer informações a partir da monitorização da temperatura da piscina de fusão para poder controlar os parâmetros do processo para a qualidade da peça.

Em comparação com os outros processos, os processos PBF, têm avançado principalmente no sistema de monitorização de temperatura usando sensores. Atualmente, os principais problemas de qualidade identificados foram a distribuição heterogênea da temperatura do leito de pó e da potência de saída do laser.

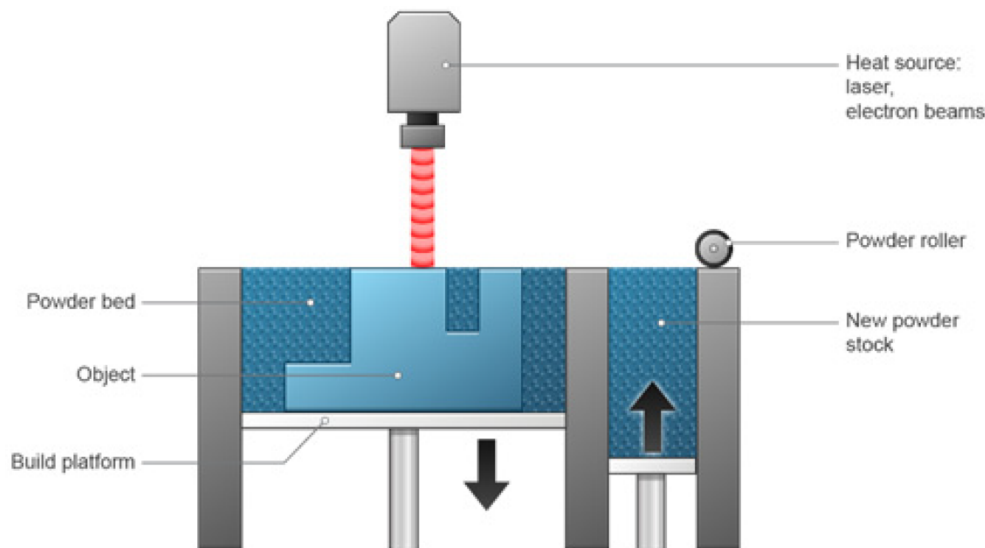


Figura 16 – Powder Bed Fusion retirado de (Parupelli and Desai 2019)

2.2.4.6 Sheet Lamination Processes (SLP)

Os processos de laminação de folha (SLP) são uma das técnicas de fabricação aditiva para construir uma estrutura 3D por laminação sequencial, colagem e corte de folhas de seção transversal 2D de um polímero, papel revestido de cerâmica ou papel composto por um laser ou uma faca e camadas, colado por cola ou revestimento adesivo. Esta técnica também é designada por fabricação de objetos laminados (LOM) e apresenta-se de forma esquemática na Figura 17.

O processo de colagem é realizado por calor ou pressão aplicada a partir de um cilindro aquecido que rola ao longo da chapa (Klosterman et al. 1998). Esta técnica pode processar materiais cerâmicos que tenham estabilidade mecânica, térmica e química adequada para proteções de alto desempenho. O desafio está no processo de colagem para evitar a delaminação.

O processo LOM é separado em dois métodos quando se trata da forma de laminar uma folha de material. O método “cut-then-bond”, que corta primeiro e depois reposiciona na peça de trabalho para ligar, é eficaz para o desentortar, no entanto, causa uma perda na precisão de posicionamento aumentando o erro acumulado. O bond-then-cut, que liga uma folha na peça de trabalho e depois corta-a a laser, não é capaz de executar peças complicadas (por exemplo, oco e vaso) devido à dificuldade em desencubar o material residual interno de modo a consumir alta potência laser para desentortar e crosshatching. Além disso, é um processo demorado e dependente de trabalho manual.

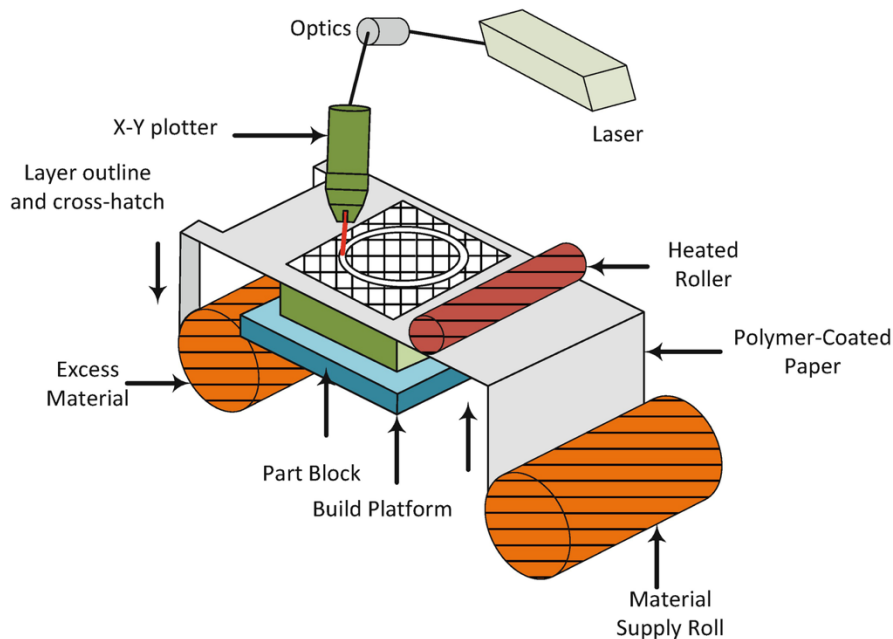


Figura 17 – Sheet Lamination retirado de (Gibson, Rosen, Stucker, Khorasani, Gibson, et al. 2021)

2.2.4.7 Photopolymer vat processes (PVP)

Photopolymer vat processes (PVP) baseiam-se na solidificação seletiva de um polímero líquido utilizando fontes luminosas, ultravioleta por exemplo (Vaezi et al. 2013). Stereolithography (SL or SLA) é a principal técnica amplamente utilizada especialmente no campo da engenharia biomédica, como a engenharia de implantes e tecidos (Gardan 2016).

No entanto, a técnica photopolymer vat também apresenta algumas desvantagens. Por exemplo, a resina líquida utilizada é mais cara do que outros materiais de impressão 3D, o que aumenta o custo da impressão. Além disso, as peças impressas são geralmente menos resistentes do que as impressas em outros materiais, o que pode limitar sua utilização em determinadas aplicações.

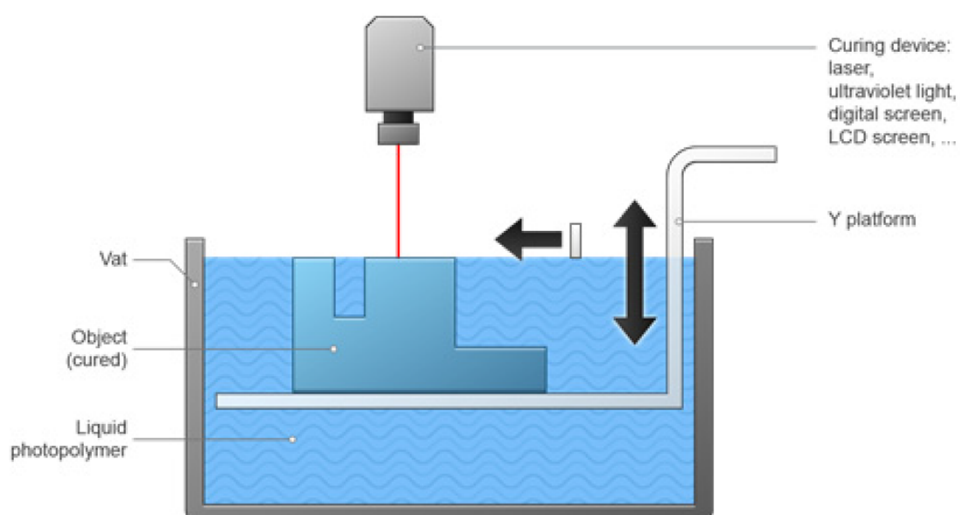


Figura 18 – Photopolymer Vat retirado de (Parupelli and Desai 2019)

2.2.5 COMPARAÇÃO DE TIPOS DE IMPRESSÃO

Após a análise detalhada dos processos existentes para impressão 3D de materiais foi possível resumir todos os dados relativos a descrição de vantagens e desvantagens associadas a cada um dos procedimentos e materiais associados a cada formato de impressão estando descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela comparativa de formatos de impressão

Categoria	Vantagens	Desvantagens	Materiais
Material jetting	Baixo desperdício; Alta precisão e velocidade; Permite a impressão de peças com múltiplos materiais e cores; Propriedades mecânicas e térmicas homogêneas.	Alto custo; Necessidade de material de suporte; Materiais limitados.	Polímeros e plásticos.
Binder jetting	Uso de vários materiais; Mais rápido do que outros métodos; Diferentes propriedades mecânicas e combinações de pó aglutinante podem ser alcançadas.	Necessidade de material de ligação; Nem sempre adequado para peças estruturais; Requer mais tempo; Processo pós impressão adicional é necessário.	Metal, polímeros e cerâmicas.

Material extrusion	Processo econômico; Permite cores múltiplas; Boas propriedades estruturais; Máquina de tamanho reduzido.	Raio do bico afeta a qualidade final; Menor precisão e velocidade; Necessidade de pressão constante do material para aumentar a qualidade dos acabamentos.	Polímeros e plásticos.
Powder bed fusion	Ampla variedade de materiais; Custo baixo.	Variação nos acabamentos; Necessidade de pós-processamento; Processo caro; Longa duração; Materiais limitados; Necessidade de estruturas de suporte; Pós-cura é necessária.	Qualquer material em pó baseado em difusão.
Sheet lamination	Corte muito rápido; Permite a combinação de folhas metálicas, incluindo a incorporação de componentes.	Variação nos acabamentos; Requer pós-processamento; Processo caro; Materiais limitados; Necessidade de estruturas de suporte.	Qualquer material capaz de ser enrolado em folhas.
Directed energy deposition	Controle avançado da estrutura dos grãos; Alta precisão; Superfície de acabamento boa; Processo relativamente rápido; Adequado para áreas de construção grandes.	Variação nos acabamentos; Necessidade de pós processamento; Processo caro; Materiais limitados.	Plásticos, metais, cerâmicos.
Vat photopolymerization	Alta precisão; Boa superfície de acabamento; Processo relativamente rápido; Adequado para áreas de construção grandes.	Variação nos acabamentos; Requer pós processamento; Processo caro; Materiais limitados; Necessidade de estruturas de suporte.	Polímeros.

2.2.6 DESAFIOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D

Neste tópico serão abordados alguns desafios a resolver ou metas que se deverão atingir num futuro próximo de forma a tornar a impressão 3D numa ferramenta do dia-a-dia das empresas de construção. Relativamente ao caminho evolutivo que esta técnica pode percorrer, este passará por

aumentar a possibilidade de produção em grande escala recorrendo à criação de novos materiais ou melhoria de eficiência nas técnicas já existentes. Por outro lado, deverá ser necessário incorporar resíduos ou materiais alternativos que estejam disponíveis no local de trabalho de forma a existir uma diminuição de custo em material. De forma a reduzir a dependência de materiais tradicionais, também tornar o processo de construção num processo mais eficiente em termos energéticos e vantajoso em termos de redução de emissões de carbono, tentando assim tornar este processo construtivo num processo sustentável. Devido a ser uma técnica recente tem falta de normas e regulamentos que no futuro terão de ser criados de forma a conseguir existir alguma coerência quando for utilizada a impressão 3D na construção civil, e ser possível a correta fiscalização desta atividade. Por último, poderá ser utilizada a inteligência artificial ou outras tecnologias de forma a ser possível monitorizar e existir uma conexão entre as várias equipas envolvidas no projeto em tempo real.

2.3 INDÚSTRIA 4.0

2.3.1 DEFINIÇÃO DE CONCEITO

A Indústria tem vindo a evoluir, e tem sofrido várias transformações, sendo definido esse progresso como industrialização, que é considerada como a revolução existente na indústria que começou no ano de 1700 (Alaloul et al. 2020). O número 4 está associado a ser a 4ª revolução em termos de número de ordem, tendo cada uma delas a si associado um papel evolutivo em alguma área específica. Na primeira revolução, foram introduzidos os equipamentos mecânicos a vapor e movidos a força da água aprimorando assim a estrutura económica existente na altura. Na segunda revolução industrial, que ocorreu por volta de 1870, foi introduzida a energia elétrica que possibilitou a criação de sistemas de produção em massa. Quase um século depois, durante a década de 70, surgiu a terceira revolução industrial que teve como principal benefício o avanço ao nível da eletrónica, associado a evolução da tecnologia atingindo os dispositivos móveis existentes na atualidade, podendo assim ser denominada como a Revolução Digital. Por último surge a revolução atual, a quarta, que tem como principal objetivo a conexão entre as pessoas e as tecnologias existentes.

Indústria 4.0 é um conceito que surgiu na Alemanha em 2011, durante a Feira de Hannover, conceito este que tinha a visão da criação de uma nova revolução industrial, com o objetivo de ser possível adotar tecnologias avançadas que consigam transformar a produtividade, aumentando-a, associada a processos (Schwab 2017). Este conceito tem como principais características a digitalização, a conexão em tempo real e a automação, de forma a ser possível criar uma fábrica inteligente, flexível e eficiente. Para além das suas características apresenta também diversas tecnologias a si associadas como por exemplo Inteligência Artificial, realidade aumentada, digitalização, impressão 3D, entre outras. Estas tecnologias permitem assim, coletar e analisar dados em tempo real, a comunicação entre sistemas e dispositivos, a tomada de decisão informada. A chave para a implementação da Indústria 4.0 com sucesso está relacionada com essa relação entre as possíveis coletas e análise de dados e com o facto de serem em tempo real podendo oferecer novas possibilidades de atuação para as equipas de gestão (Gilchrist, 2016). A implementação deste tipo de indústria exige uma mudança significativa na infraestrutura tecnológica e na cultura organizacional existente nas empresas. Para além disso, requer uma abordagem colaborativa e aberta envolvendo parcerias que possam impulsionar a inovação e o desenvolvimento das soluções tecnológicas envolvendo organizações, empresas, governos, entre outros. Por incluir todas estas vertentes que se encontram presentes no meio organizacional a Indústria 4.0 representa uma grande oportunidade para as empresas aumentarem a sua eficiência operacional, diminuírem os seus custos e poderem oferecer uma melhor experiência ao utilizador

conseguindo com isso quebrar a barreira entre ferramentas digitais e entidades e/ou equipas envolvidas nos processos.

2.3.2 INDÚSTRIA 4.0 ASSOCIADA À CONSTRUÇÃO CIVIL

Os projetos de Construção Civil têm uma elevada complexidade uma vez que, estão envolvidas várias entidades que nem sempre têm os mesmos interesses. Para além disso a construção tem a si associado um grau de incerteza bastante elevado devido a sua imprevisibilidade acrescentando a isto também as complicações ao longo de todas as etapas. Por outro lado, outro problema desta indústria é a cultura a si associada, que é uma cultura bastante rígida e que apresenta alguma resistência à mudança (Oesterreich and Teuteberg 2016). Através de vários estudos foi possível verificar-se que a produtividade da indústria da construção manteve-se constante ou até mesmo diminuiu quando comparada a outros setores, que tem testemunhado aumentos de produtividade nas últimas duas décadas. Uma pesquisa da McKinsey identificou diversas iniciativas que poderão potenciar a produtividade no setor da construção, passando pela implementação de, por exemplo, tecnologias digitais, novos materiais e a inclusão da automação nas etapas construtivas (Venkata Siva Rama Prasad 2022).

De forma a colmatar os grandes problemas da indústria da construção, tendo em conta que esta atividade é das que tem maior impacto na economia dos países, a Indústria 4.0 procurou estabelecer metas que o setor deverá atingir ou tentar desenvolver-se nesse sentido, estabelecendo assim, o conceito de Construção 4.0 que tem como principais objetivos a melhoria da qualidade e produtividade, a eficiência de recursos, a redução de atrasos e custos excedentes, seguindo assim um caminho que pretende atingir a digitalização no setor e industrialização dos seus processos Figura 19 (Craveiro et al. 2019).

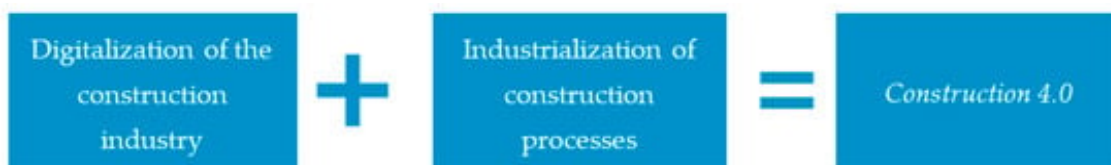


Figura 19 – Construção 4.0 retirado de (Forcael et al. 2020b)

Associado a estes objetivos a inteligência artificial (AI) e o Building Information Modelling (BIM) estão a revolucionar o setor da construção. O BIM integra informações construtivas num sistema único, permitindo tomar decisões mais informadas e ter controlo em todas as fases do projeto. Com a AI, é possível automatizar tarefas complexas e realizar análises avançadas para melhorar o planeamento, a construção e a manutenção de projetos. Ambos conferem um grande número de vantagens para todos os intervenientes no processo construtivo.

Em suma, a Indústria 4.0 pretende no ramo da Engenharia Civil atingir o aumento de produtividade de processos, o aumento de qualidade dos produtos finais, a criação de melhores materiais ou mais adequados e a possibilidade de analisar a etapa do ciclo produtivo em que se encontra com recurso a dados em tempo real.

2.4 IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

2.4.1 IMPRESSÃO 3D DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O betão é, atualmente, um material de construção massivo, e não se espera uma alternativa que satisfaça as necessidades legítimas das sociedades em termos de infraestruturas, habitação e melhoria do nível de vida, pelo menos para a geração seguinte. A civilização depende deste material compósito inorgânico, cujas matérias-primas básicas, cimento, agregados e água, se encontram amplamente disponíveis a nível mundial e o tornam pouco dispendioso. Além disso, endurece na maioria dos ambientes habitáveis, bem como debaixo de água, podendo ser utilizado numa vasta gama de obras de construção (Nunes and Costa 2021).

As tecnologias de construção inovadoras e o desenvolvimento de materiais mais ecológicos são considerados métodos eficazes para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono associadas à construção e património edificado. A introdução de processos digitais de fabrico para a construção, nomeadamente a impressão 3D de materiais cimentícios, geralmente argamassas, demonstrou que um processo digital/automatizado pode proporcionar benefícios substanciais, nomeadamente a liberdade arquitetónica sem necessidade de cofragens, o aumento da produtividade, a redução de custos, e locais de trabalho mais seguros bem como benefícios ambientais associados à poupança de materiais e redução da produção de resíduos (Denmark 2021). No entanto, a tecnologia de impressão 3D impõe novos requisitos ao nível material. a impressão 3D de materiais cimentícios exige uma consistência que permita a bombagem desde a produção até à cabeça de impressão. Simultaneamente, os materiais imprimíveis devem revelar capacidade de construção para manter a forma impressa em camadas e sem colapso. Para assegurar tal comportamento, a conceção da mistura necessita de mais materiais finos (cimento+adições) e adjuvantes (superplastificante, VMA).

Existem já casos Show off de aplicações de impressão 3D com materiais cimentícios, tais como edifícios de habitação, mobiliário urbano, elementos com carácter estrutural e arquitetónico, como se exemplifica na Figura 20, que demonstram já um grande desenvolvimento na utilização deste tipo de técnicas.



Castle printed in 3D



Castilla La Mancha Park Bridge printed in 3D
(Madrid Spain)



3D printed TECLA habitat project
(Massa Lombarda, Italy)



3D printed IAAC Pavilion
(Barcelona, Spain)



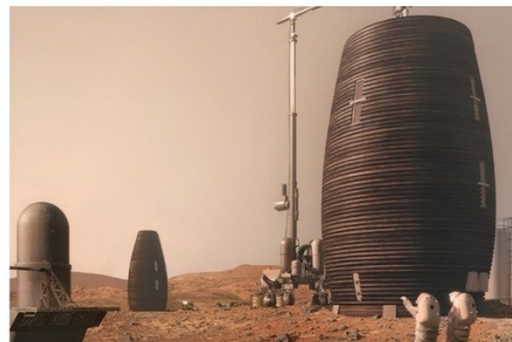
World's Largest 3D Printed House (Apis Cor)
(Dubai)



GAIA 3D printed housing project
(Shambhala, Italy)



Milestone Project. Urbanization of houses in 3D
(Netherlands)



MARSH Project
NASA's House on Mars Prototype

Figura 20 – Exemplos de edifícios impressos em 3D retirado de (Robayo-Salazar et al. 2023)

2.4.1.1 Composições comerciais

Tendo em conta os materiais que podem constituir a argamassa várias empresas que já produziam outros tipos de materiais quiseram entrar neste mercado promissor para a Engenharia Civil, conseguindo assim criar materiais com especificações predefinidas de forma a facilitar os novos utilizadores desta tecnologia construtiva, não tendo estes de fabricar a mistura tendo de

compreender quais os componentes que deverá utilizar. Em termos de produtos comerciais temos então uma argamassa da Weber, designada por Weber 3D 160-1 que em termos de adições contem calcário e fibras. De outra marca, a Sika, existe também um produto denominado por Sikacrete-752 3D que também já contém aditivos e a máxima dimensão dos seus agregados é de 2mm. Para além dos já referidos temos materiais como o LowC-Bionic do Grupo Secil, a mistura D.Fab da empresa Cemex e também CyBe Mortar da empresa CyBe, entre outras (Manikandan et al. 2020).

2.4.1.2 Composições não proprietárias

Relativamente a misturas que tenham sido utilizadas por outros autores, mas que não pertencem a marcas comerciais estão baseados no uso agregados finos, cimento Portland, sílica de fumo, cinzas volantes, entre outros. Relativamente às várias possibilidades de materiais constituintes sólidos da mistura será efetuada uma análise resumida sobre a vantagens de cada um. As cinzas volantes conferem vantagens ao nível de propriedades reológicas aumentando também a “yield stress” e a viscosidade do material. Por outro lado, a sílica de fumo consegue conferir vantagens ao material propriedades associadas às capacidades mecânicas e também aumentar a impermeabilização do material no estado endurecido. Conseguem-se também utilizar fibras de várias naturezas como fibras de carbono, de basalto, de ferro e de outros materiais diversos, que conseguem melhorar as capacidades associadas às capacidades resistentes do material impresso. Por fim poderá também ser alterado o tipo de agregado a utilizar de forma a ser possível incorporar resíduos de construção e demolição incluindo materiais como o tijolo ou o vidro têm vindo a ser utilizados e tem mostrado bastante potencial para a obtenção de um material sustentável que vá de encontro aos conceitos associados a Economia Circular (Fonseca and Matos 2023).

2.4.1.3 Propriedades no estado fresco

Relativamente às propriedades no estado fresco a que merece maior foco é a trabalhadade da mistura, uma vez que caso não seja uma mistura com boa trabalhadade poder comprometer a extrusão. Mas o aumento nesta propriedade leva à diminuição das propriedades mecânicas do material. Muitos investigadores têm utilizado aceleradores ou retardadores de presa ou superplastificantes de forma a compensar a trabalhadade perdida tendo assim o equilíbrio entre ambas as propriedades (Zhou et al. 2023). Outras duas características importantes são a extrudabilidade e a capacidade de impressão (“printability”), onde a primeira passa pela capacidade da impressora conseguir formar filamentos contínuos de material sem que haja segregação ou fratura deste. Por outro lado, a imprimibilidade é definido como a capacidade do material ser impresso sem entupir o bico de extrusão e com filamentos contínuos, não existindo quebras de ritmo de extrusão, sendo favorável quando forem utilizadas fibras serem fibras de pequenas dimensões.

2.4.1.4 Caracterização mecânica

O betão à base de cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil devido à sua disponibilidade e familiaridade. Os betões correntes apresentam uma resistência à compressão média entre 30 MPa e 60 MPa, garantindo uma base sólida para a estrutura impressa em 3D relativos a este tipo de esforços. A resistência à flexão desse betão, embora geralmente mais baixa, varia de 2 MPa a 5 MPa, o que pode ser melhorado com a adição de fibras. O módulo de elasticidade do betão de cimento Portland situa-se em torno de 30 GPa. Além disso, a densidade desse betão varia entre 2200 kg/m³ e 2500 kg/m³, garantindo um equilíbrio adequado entre resistência e massa.

Por outro lado, a adição de fibras aos materiais cimentícios para impressão 3D proporciona melhorias significativas nas propriedades mecânicas, nomeadamente ao comportamento em tração bem como conferindo ductilidade. A resistência à compressão desse betão reforçado com

fibras de aço varia de 50 MPa a 100 MPa, demonstrando um aumento considerável em relação ao betão sem fibras. A resistência à flexão também é significativamente aprimorada, alcançando valores de 8 MPa a 12 MPa, podendo até atingir valores próximos de 30 MPa (Hambach and Volkmer 2017). O módulo de elasticidade situa-se entre 30 GPa e 50 GPa, apresentando maior rigidez em comparação com o betão convencional. Além disso, a adição de fibras de aço tem um impacto mínimo na densidade do betão impresso em 3D, mantendo-se próxima à do betão sem fibras. As suas propriedades podem também depender da orientação das fibras e do caminho de impressão utilizado.

Relativamente materiais cimentícios para impressão 3D, podem ter diferentes características consoante a aplicação (estrutural ou não estrutural). Apresenta-se em formato gráfico valores referentes a diversas misturas com componentes constituintes (Lesovik et al. 2021)

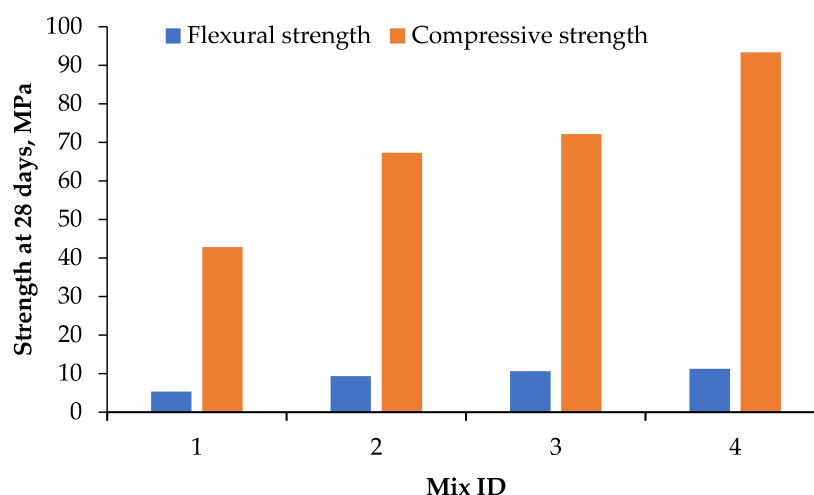


Figura 21- Valores de resistência mecânica retirados de (Lesovik, 2021)

2.4.1.5 Caracterização higrotérmica

Apesar das propriedades mecânicas serem bastante importantes para a viabilidade da estrutura, as propriedades térmicas tem vindo a ser também bastante analisadas, principalmente nos últimos anos, porque são estas que conseguem garantir um baixo consumo energético nos edifícios (Asadi et al. 2018). Uma das caraterísticas do material com maior relevância é a condutibilidade térmica, que no betão convencional encontra-se entre 1,4 e 3,6 W/(m.K) (Talebi et al. 2020), sendo que este valor poderá variar dependendo de três fatores, o valor de temperatura, os materiais presentes na mistura e por último a densidade do material, sendo que a presença de materiais mais densos trará um maior valor de condutibilidade ao betão (Liu et al. 2017). Associada a esta conexão entre os valores de densidade e o da condutibilidade térmica do material, vários estudos foram efetuados de forma a ser possível estabelecer algum tipo de correlação entre ambas as propriedades. Estudos estes que indicam um intervalo de valores associados a betão, apresentando-se em esquema gráfico (Figura 22) um estudo feito por (Talebi et al. 2020) relativo a esta propriedade para betão convencional com diferentes densidades. Da mesma forma, é apresentada outra pesquisa efetuada por (Real et al. 2016) que tem como propósito resumir todos os valores encontrados de condutibilidade térmica associados a betões de baixa massa volúmica. É possível então verificar que, de facto, os valores de densidade tem elevada importância no desempenho térmico do betão, deste modo será necessário verificar as caraterísticas pretendidas de forma a fazer corresponder os constituintes do material ao objetivo pretendido. Por último num estudo efetuado por (Markin et al. 2019) onde os valores associados a esta propriedade foram, para o betão convencional, de densidade 2200 kg/m³ e betão impresso por 3D, de densidade 2100

kg/m, de 1,70 e 1.68 W/mK respetivamente (Figura 23). É demonstrado assim que esta técnica construtiva em pouco influencia o valor da condutibilidade térmica.

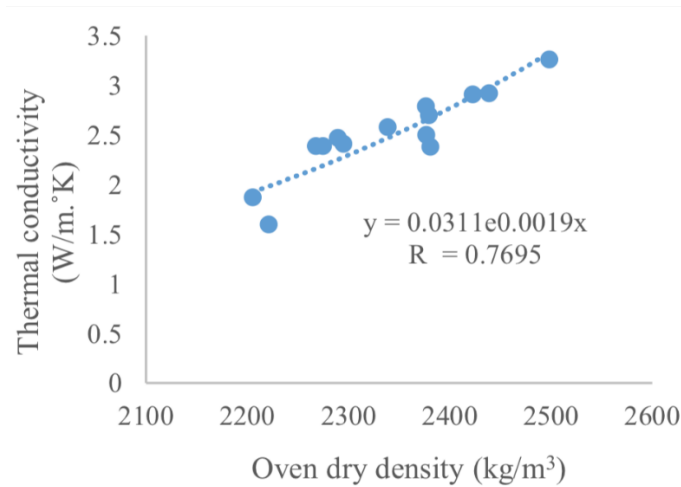


Figura 22 – Condutibilidade térmica para betão corrente retirado de (Talebi et al. 2020)

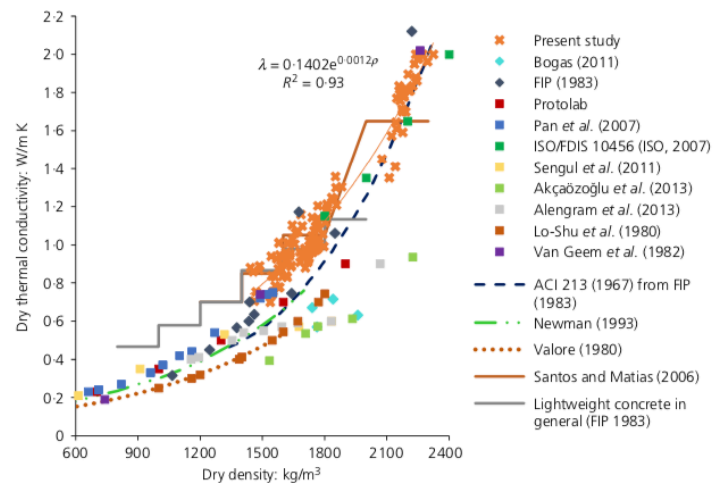


Figura 23– Condutibilidade térmica para betão de baixa densidade retirado de (Real et al. 2016)

Outro fator importante para ser efetuada a caracterização higratérmica do material é a absorção de água por capilaridade que tem como objetivo verificar a sua permeabilidade conseguindo verificar se a presença de água no ambiente em redor onde será utilizado o material não irá comprometer a segurança da estrutura relativamente a fissuração. Em termos práticos, os valores associados a esta propriedade encontrados, em $\text{Kg/m}^2 \text{s}^{0.5}$, tomam valores entre 0,0012 e 0,0176 para betão e entre 0,0147 e 0.0226 para rebocos, tendo em conta que os valores dependem da presença de repelente de água (Sousa 1996)

3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ENQUADRAMENTO

Para viabilizar uma análise da impressão 3D como técnica construtiva, é necessário definir todos os passos relacionados a esse processo. O primeiro passo consiste na definição do material utilizado. Em seguida, é necessário estabelecer todos os procedimentos para a fabricação dos provetes, desde o desenho da peça até à impressão dos provetes, os quais são resumidos na Figura 24. Neste capítulo, apresentam-se todas as ferramentas utilizadas e o percurso adotado para a realização dos provetes desejados. Também será abordada a metodologia de análise de propriedades, utilizando ensaios normativos com o objetivo de comentar os valores das propriedades mencionadas anteriormente. Por fim, o objetivo é analisar essas propriedades por meio de ensaios laboratoriais, apresentando os resultados para posterior discussão e análise.

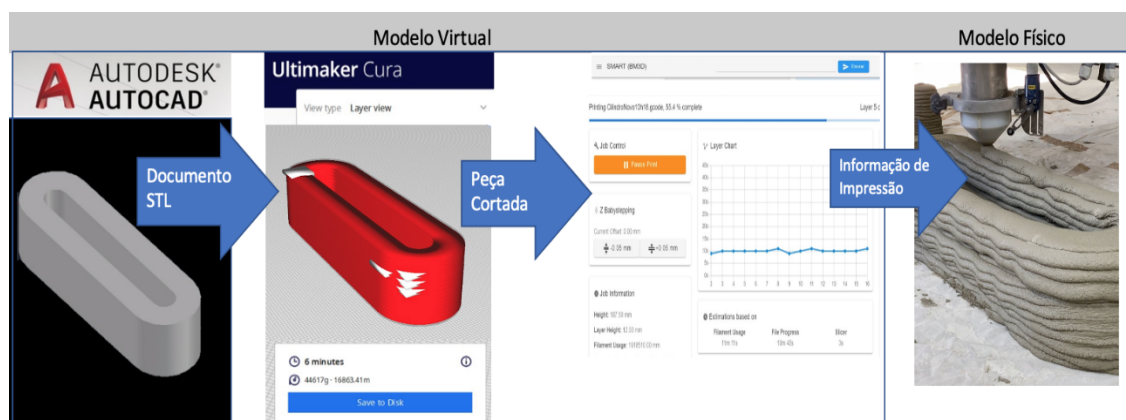


Figura 24 – Esquema resumo de Impressão 3D

3.2 ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D

A composição da argamassa em estudo é desconhecida, e o fornecedor não pode ser divulgado. Contudo, os componentes da argamassa são CEM I 52,5, areia de quartzo com dimensão máxima se 1 mm, filler calcário, aditivos reológicos e fibras de polipropileno. A razão água/ sólidos é de 0,16 e a argamassa é classificada como C50/60. A argamassa é apresentada na Figura 25.



Figura 25 – Fotografia da argamassa comercial ensacada para Impressão 3D utilizada neste trabalho

3.3 FABRICO DE PROVETES

De forma a ser possível a análise etapa a etapa, focando em cada uma das especificidades envolvidas nos seus processos, este tópico será subdividido em várias partes, sendo elas:

- Desenho da Peça (autocad);
- Corte Virtual da peça/slice (Ultimaker Cura)
- Envio para Software Máquina
- Preparação da Mistura
- Impressão de Provates

3.3.1 DESENHO DA PEÇA

Com o objetivo inicial de se criar um objeto a partir apenas de uma embalagem de material, será inicialmente necessário fazer vários esquemas inicialmente em papel de forma a ser possível visualizar-se o objetivo que terá a impressão. Neste caso a decisão passou pelas dimensões necessárias para os ensaios a efetuar mais tarde, deste modo foi decidido fazerem-se vários tipos de provates quando se classifica relativamente às características de impressão, mas relativamente a geometria apenas foram necessárias duas geometrias, um cilindro com 10cm de diâmetro e 20cm de altura e um anel que consiga conter nas suas faces retas (vários provates de 10x10x20cm).

Tendo em conta as dimensões pretendidas dos provates foi necessário criar, numa ferramenta de desenho virtual, tendo sido a escolhida o Autocad, para se desenhar o objetivo final que se pretende concluir. Inicialmente este processo começa pelo desenho da base do objeto pretendido utilizando a ferramenta “Polissólido” que irá criar um sólido geométrico que será a peça pretendida. Alternativamente poderá desenhar-se a forma geométrica da base e utilizar o comando “extrude” de forma a concretizar essa peça em 3D. Após verificação se a peça cumpre todos os requisitos dimensionais iniciais e se não existem erros poderá ser guardado o ficheiro e em seguida exportá-lo como um ficheiro STL de forma a ser lido pelos programas de corte do objeto, estando assim concluído o processo que engloba o desenho que se pretende extrudir na impressora. Concluindo, poderá então ser subdividido esta fase do procedimento em 4 etapas principais, sendo elas:

1. Desenho da base com as dimensões pretendidas;
2. Uso do polissólido (ou extrude);
3. Verificação se todos os pontos se encontram fechados e sem erros;
4. Guardar o ficheiro e exportá-lo como ficheiro STL.

Será obtido então, como resultado final para ambas os provetes pretendidos, uma geometria equivalente à representada na Figura 26.

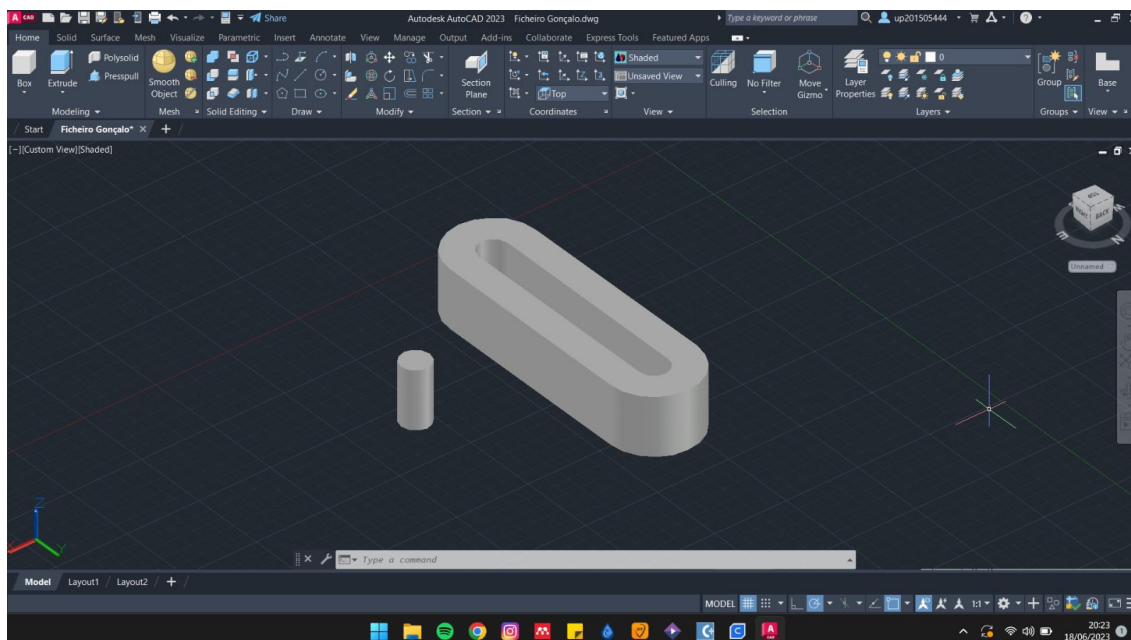


Figura 26 – Peças pretendidas desenhadas no AutoCAD

3.3.2 CORTE DA PEÇA

Após se ter o arquivo do AutoCad em formato STL será necessário abri-lo numa aplicação que consiga transformar um desenho em 3D num ficheiro que transmita o que irá acontecer no processo de impressão, tendo assim de existir o corte da estrutura por camadas de forma a ser possível extrudir o material sem a existência de problemas, transformando assim o desenho CAD num ficheiro G-Code. Um ficheiro G-Code é um ficheiro que contém todas as coordenadas de relevo para o projeto, de forma a poder informar a impressora de quais os pontos a seguir no seu trajeto. O programa utilizado foi o Ultimaker Cura, apresentado na figura Figura 27, que, para além do corte do objeto, tem também a possibilidade de alterar as caraterísticas da impressão como velocidade, quantidade de material, entre outras caraterísticas. Deste modo, apresenta-se em seguida nas Tabela 2 e Tabela 3 um guião de forma a ser mais facilmente compreendidas todas as alterações efetuadas no programa em questão de forma a obter os resultados pretendidos, sendo incluídos os resultados finais de duas sessões de impressão em dias diferentes. Tendo sido o primeiro dia para verificação dos parâmetros que teriam influência na qualidade dos provetes e o segundo para concretizar os objetivos de impressão desta tese.

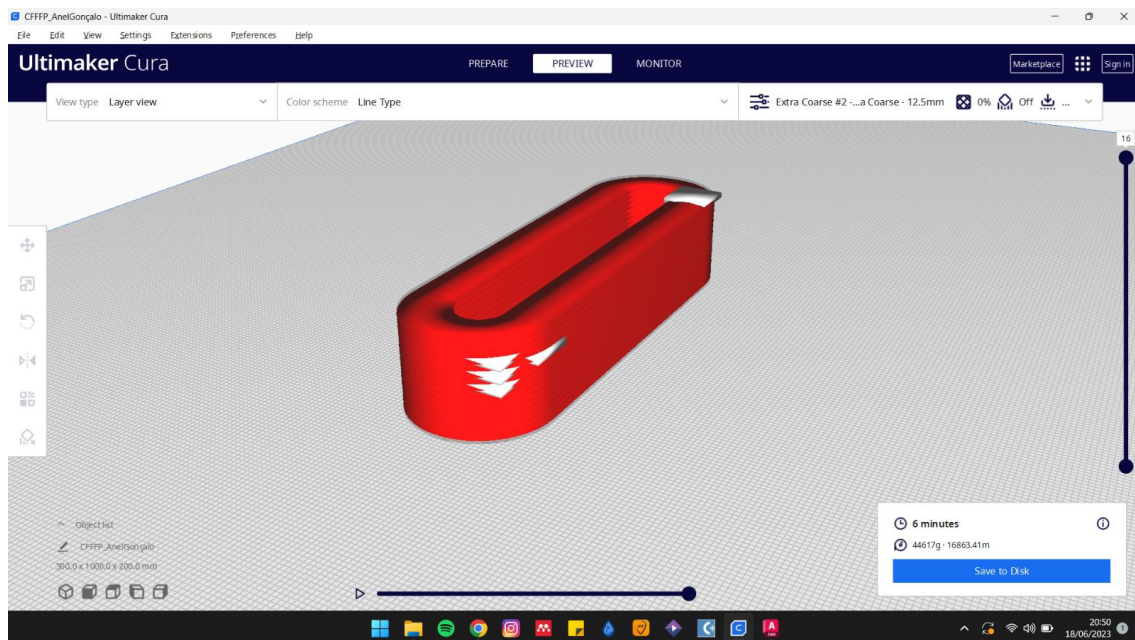


Figura 27 – Corte da peça no Ultimaker Cura

Tabela 2 – Parâmetros de impressão da primeira sessão de impressão

Amostras			
Altura da camada(mm)	12,5	15	20
Altura inicial da camada (mm)	16	15	20
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	25	25	25
Largura da linha (mm)	35	35	35
Geometria (Autocad)	cilindro com 100 mm de diâmetro e ponto no meio	cilindro com 100 mm de diâmetro	cilindro com 100 mm de diâmetro
Diâmetro real (mm)	140	140	140
Velocidade de impressão Cura (mm/s)	100	100	100
Velocidade de impressão real (mm/s)	30	30	30
Deslocamento Z (mm)	0	10	10
Número de camadas	16	14	10
Resultados finais observáveis	a primeira camada estava demasiado achatada	Mau acabamento	

Tabela 3 – Parâmetros de impressão da segunda sessão de impressão

Amostras		
Altura da camada (mm)	12,5	12,5
Altura inicial da camada (mm)	12,5	12,5
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	25	25
Largura da linha (mm)	35	35
Geometria (Autocad)	cilindro com 70 mm de diâmetro	anel com uma espessura de camada de 35mm
Diâmetro real/espessura da camada (mm)	100	100
Velocidade de impressão Cura (mm/s)	100	100
Velocidade de impressão real (mm/s)	30	90
Deslocamento Z (mm)	10	12
Número de camadas	16	16
Resultados observados visualmente	Inicialmente a mistura mostrou um mau acabamento, então colocamos vibração no 75 durante toda a sessão de impressão	

3.3.3 PREPARAÇÃO DA MISTURA

Nesta fase foi necessário preparar a mistura a utilizar para ambos os tipos de provetes, tradicionais e impressos, e para isso foi apenas utilizado o material descrito em cima, e água.

A dosagem de água utilizada nesta mistura foi, em termos de percentagem, de 11,5% da massa dos sólidos. A mistura dos materiais sólidos e água foi realizada numa misturadora Multimix sendo esta apresentada na figura tal como a sua ficha técnica, sendo apresentada na Figura 28. Quando compósito se apresentava homogêneo, foi vertido num balde e depois vertido diretamente na

cabeça de impressão. Apresenta-se Figura 29 de forma resumida todas as etapas efetuadas nesta fase.



Misturador	MULTIMIX 100 230 V
REFERÊNCIA	00627405
CAPACIDADE DA CUBA	100 L
LIGAÇÃO ELÉCTRICA	230 V / 50 Hz
POTÊNCIA	2.0 Kw 42 RPM
GRÃO MÁXIMO	32 mm
DIMENSÕES	720 * 690 * 1190 mm
PESO	80 Kg
ALTURA DE CARGA	1190 mm
ALTURA DE DESCARGA	640 mm

Figura 28 - Misturadora utilizada e sua ficha técnica



a) Humedecer a misturadora



b) Colocar a argamassa na misturadora



c) Colocar a dosagem de água pesada



d) Colocar a mistura na impressora

Figura 29 – Preparação da Mistura para Impressão

3.3.4 IMPRESSÃO DE PROVETES

A impressão do compósito foi realizada com uma impressora smart da BeMore3D que se apresenta na Figura 30. Foram produzidos todos os provetes ,com diferentes dimensões de camada e velocidade de impressão e geometria que se apresentam nas Tabelas 2 e 3. Apresentam-se algumas imagens relativos ao procedimento de impressão de cada tipologia de provete, nomeadamente cilindro (Figura 31), anel (Figura 32), e também apresentados os provetes finais (Figura 33).

Foram também moldados provetes de forma tradicional em moldes de madeira, com dimensões 10x10x20cm, previamente oleados, conforme se ilustra na Figura 34, com o objetivo de fazer uma análise comparativa das suas propriedades higrotérmicas.

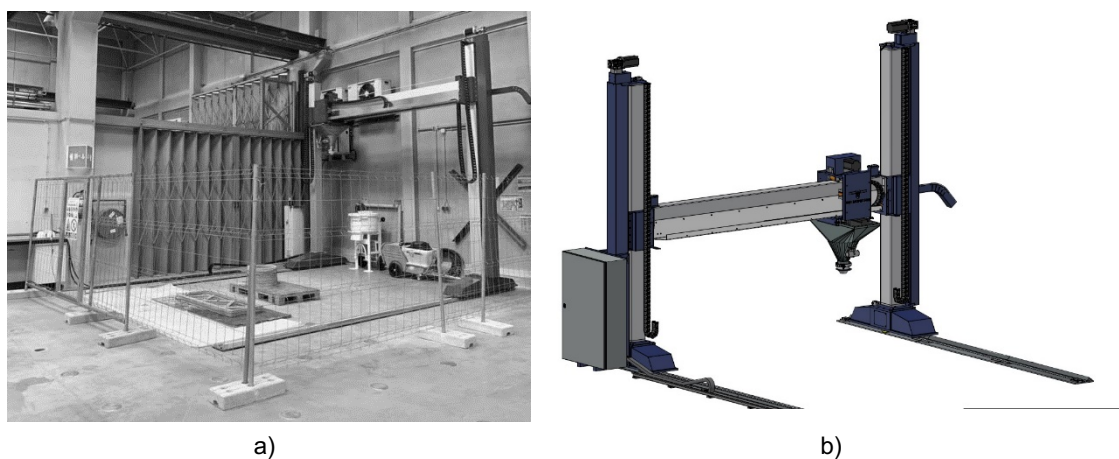


Figura 30 – Impressora 3D Bemore3D_SMART, Área de impressão 2.5mx2.5m.x3m - 6m, camada 10mm a 50mm/30mm a 150mm: a) Fotografia (na FEUP – Laboratório de Estruturas), b) Vista esquemática.



a) Fase inicial de impressão (3 camadas)



b) Fase intermédia de impressão (5 camadas)



c) Fase intermédia de impressão (11 camadas)



d) Provete cilíndrico finalizado (16 camadas)

Figura 31 – Impressão 3D de provetes cilíndricos



a) Fase inicial de impressão



b) Fase intermédia de impressão



c) Fase intermédia de impressão



d) Fase final de impressão

Figura 32 – Impressão dos provetes em formato de anel



a) Provete cilíndrico visto de frente.



b) Anel dividido em provetes (10x10) cm



c) Provetes cilíndricos



d) Provetes retangulares já cortados e com alguns ajustes no acabamento exterior

Figura 33 – Produto final proveniente da impressão 3D

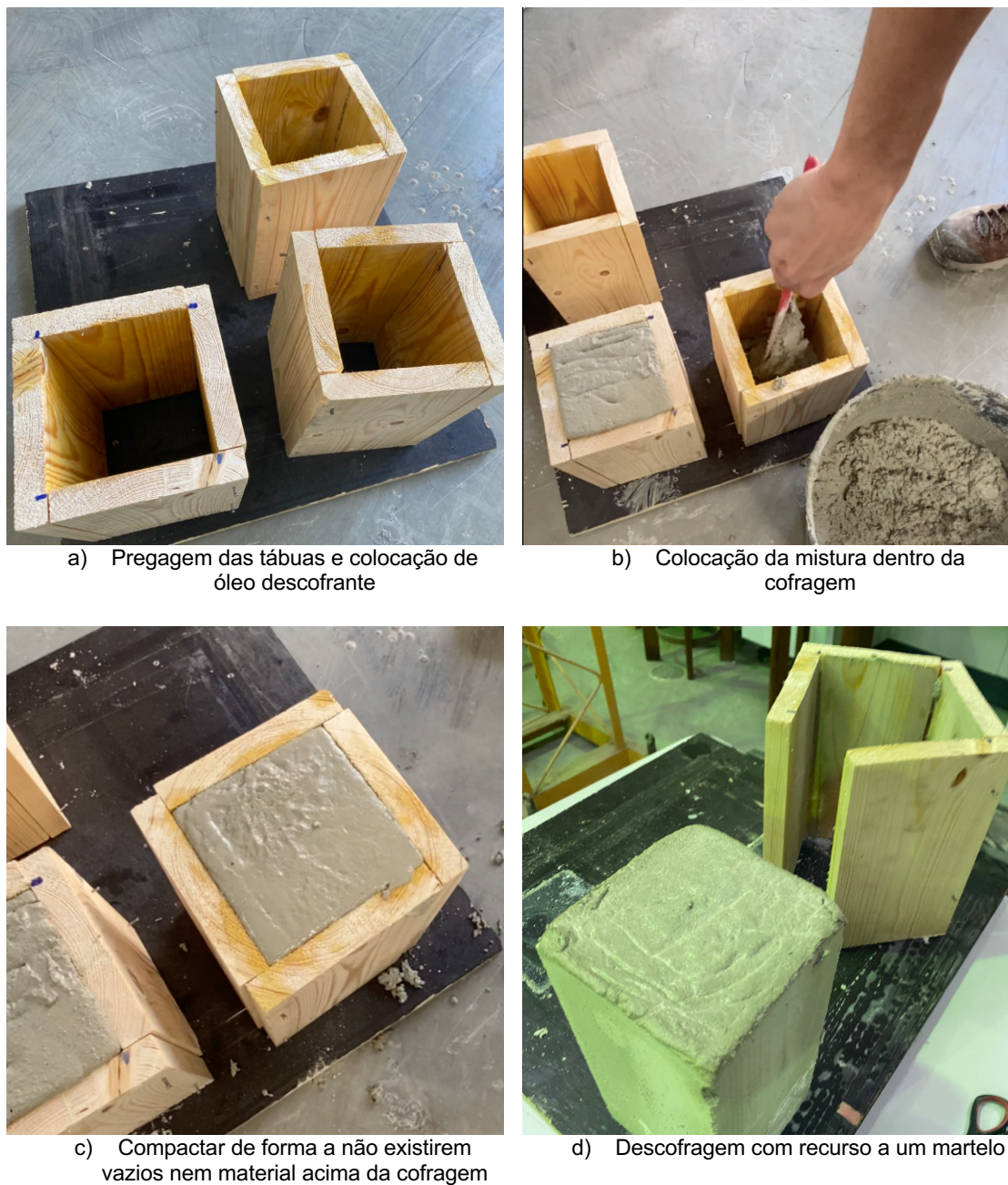


Figura 34 – Fabrico de provetes com recurso a cofragem

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os provetes produzidos foram caracterizados segundo os ensaios que se sumarizam na Tabela 2 e se descrevem em mais detalhes nas próximas secções.

Tabela 2 – Síntese dos ensaios de caracterização da argamassa.

<i>Propriedade</i>	<i>Ensaio normativo seguido</i>	<i>Idade à data de ensaio</i>	<i>Cura</i>	<i>Número de provetes para cada idade</i>	<i>Geometria dos provetes (mm³)</i>	<i>Moldado (M) ou impresso (I)</i>
Consistência (slump)	EN 12350-5	Após fabrico	-	-	-	
Resistência mecânica	NP EN 196-1	2, 14, 21 e 28 dias	20°C, HR>95%	3	Prismáticos 40x40x160	M
Condutibilidade Térmica	ASTM D 5930	28 dias	20°C, HR=65%	15	Prismáticos: 100x100x200 Cilíndricos: Diâmetro 10 Altura 20	I e M
Absorção de água por capilaridade	ISO 15148	28 dias	20°C, HR=65%	15	Prismáticos: 100x100x200 Cilíndricos: Diâmetro 10 Altura 20	I e M

3.4.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO

O primeiro ensaio a ser efetuado foi o ensaio de espalhamento que é feito logo após o fabrico da mistura de forma a testar a sua consistência. O ensaio consiste no preenchimento de um molde tronco-cônico, sendo o material compactado com recurso a uma haste de compactação. Em seguida é retirado o molde sendo este removido verticalmente ficando apenas o material na mesa. A mesa tem um sistema de pancadas que causa a sua vibração tendo sido efetuadas 15 pancadas de forma a reproduzir o assentamento do material, conforme se ilustra na Figura 31.



a) Enchimento do molde



b) Desmoldagem e início de ensaio

Figura 35 – Ensaio de espalhamento

3.4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

3.4.2.1 Resistência à tração

Para o ensaio das resistências mecânicas, o procedimento adotado foi de acordo com a norma portuguesa, NP EN 196-1. Foram moldados 3 provetes prismáticos com dimensões 40x40x160mm³ para cada idade, nomeadamente 2, 14, 21 e 28 dias. Os provetes foram mantidos em água em ambiente controlado e apenas retirados no momento do ensaio.

O ensaio de resistência mecânica foi realizado numa prensa Instron com 300 kN de capacidade com o dispositivo de flexão em 3 pontos de acordo com a NP EN 196-1 (ver Figura 36). A resistência à compressão, F_c , é calculada pela seguinte expressão:

$$F_c = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2} \quad (1)$$

Onde:

F_c – Resistência à flexão (MPa)

F – Carga máxima (N)

l – Espaçamento dos roletes inferiores (mm)

d_1 – Dimensão lateral do provete (mm)

d_2 – Dimensão lateral do provete (mm)



Suporte para ensaio a flexão



Proвете na máquina de ensaio



Rotura do provete do ensaio ao 14º dia



Estado final do provete

Figura 36 – Ensaio à tração por flexão

3.4.2.2 Resistência à compressão

No ensaio de compressão usou se o dispositivo para o efeito também de acordo com a NP EN 196-1 que está apresentado na Figura 37. A resistência à compressão é calculada pela equação seguinte:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad 2$$

Onde:

R_c – Resistência à compressão (MPa)

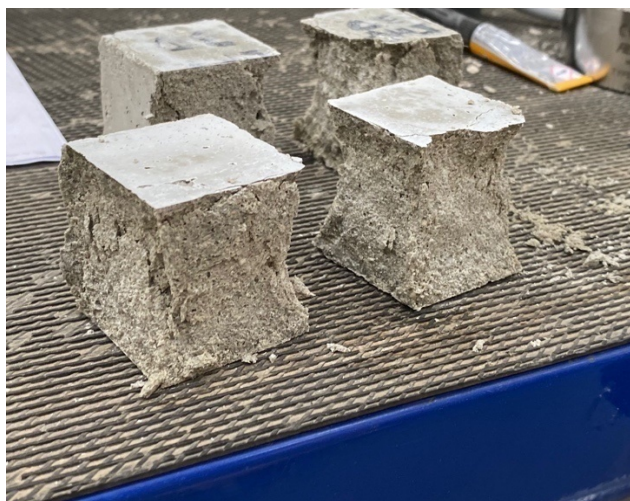
F_c – Carga máxima (N)



a) Provete na máquina de ensaio



b) Rotura do provete



c) Estado final de provetes ensaiados

Figura 37 – Ensaio de Resistência à compressão (14 dias)

3.4.3 ENSAIOS HIGROTÉRMICOS

3.4.3.1 Provetes utilizados

Relativamente às propriedades higrotérmicas foi necessário fazer uma triagem de provetes de forma a ser possível considerar 3 de cada formato de impressão para serem testados. Para isto foram escolhidos os provetes que tinham bases mais regulares de forma a ser possível executar o ensaio de condutibilidade térmica sem problemas. São assim divididos em 5 grupos os provetes que foram utilizados para a avaliação destas propriedades, (Figura 38), tendo sido numerados da esquerda para a direita. Apresenta-se a descrição das propriedades de impressão de cada tipo de provete em formato de resumo na Tabela 4. Por fim, associada à numeração de cada provete apresentam-se os seus valores reais de dimensões e massa Tabela 5.



Figura 38 – Provetes utilizados para ensaios higrotérmicos

Tabela 4 – Propriedades de impressão dos provetes para ensaios higrotérmico ordenados de acordo com a Figura 38

1	2	3	4	5
Provetes Moldados	Cilindros com ponto no meio com 100mm de diâmetro	Cubos Impressos em formato de anel cortados em (10x10cm)	Cilindros com 70mm de diâmetro	Cilindros com 100mm de diâmetro
	Altura da camada – 12,5 mm	Altura da camada 12,5 mm	Altura da camada 12,5 mm	Altura da camada=20mm
	Espessura da camada = 140mm	Espessura da camada=100mm	Espessura da camada=100mm	Espessura da camada=140mm

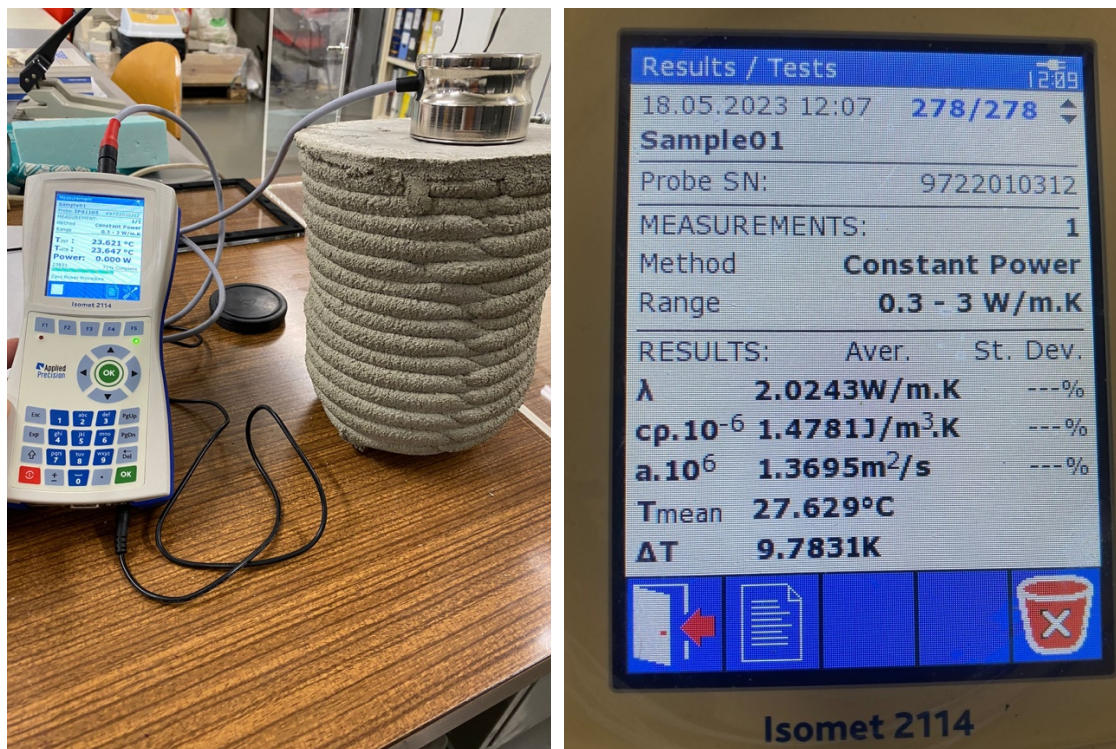
Tabela 5 – Dimensões e descrição dos provetes ensaiados

Proвете	Descrição do provete e medidas da base	Área da base	
		mm ²	m ²
Proвете 1.1	Moldado com base de 10x10cm	10000	0,010
Proвете 1.2	Moldado com base de 10x10cm	10000	0,010
Proвете 1.3	Moldado com base de 10x10cm	10000	0,010
Proвете 2.1	Impresso com ϕ 17,5cm	48106	0,048
Proвете 2.2	Impresso com ϕ 17,5cm	48106	0,048
Proвете 2.3	Impresso com ϕ 17,5cm	48106	0,048
Proвете 3.1	Impresso com base 13,2x12cm	15840	0,016
Proвете 3.2	Impresso com base 10,7x11cm	11770	0,012
Proвете 3.3	Impresso com base 11x10,8cm	12650	0,013
Proвете 4.1	Impresso com ϕ 13cm	26546	0,027
Proвете 4.2	Impresso com ϕ 12cm	22619	0,023
Proвете 4.3	Impresso com ϕ 13cm	26546	0,027
Proвете 5.1	Impresso com ϕ 16cm	40212	0,040
Proвете 5.2	Impresso com ϕ 18,1cm	51461	0,051
Proвете 5.3	Impresso com ϕ 17,3cm	48106	0,048

3.4.3.2 Condutibilidade térmica

Para o ensaio de condutibilidade térmica (λ) foi usada a sonda ISOMET 2114 e seguido o procedimento experimental definido na norma ASTM D 5930. O ensaio permite medir várias propriedades térmicas associadas ao material em questão através do uso de uma fonte plana de calor que é classificado como um método transiente de medição de condutibilidade térmica. De forma a cumprir todas as indicações presentes na norma foi necessário utilizar um medidor de

fluxo de calor em forma de disco que conseguirá oferecer às amostras variações uniformes de temperatura, em faces que sejam regulares, de forma a ser possível avaliar a capacidade de transferência de calor, a diferença de temperatura e também o valor de condutibilidade térmica. Os valores associados a calor específico (cp) e também temperatura média também foram registados tendo em conta que o dispositivo em questão consegue também fornecer valores destas caraterísticas e poderá assim ser feita uma análise dessas propriedades do material em questão. O único valor que terá de ser alterado é o range de medições do equipamento que no nosso caso foi utilizado de 0,3 a 3 devido aos valores desta propriedade encontrados no estado de arte. É representado na Figura 39 ambos os momentos dos ensaios.



Equipamentos utilizados no ensaio

Resultados obtidos no ensaio

Figura 39 – Ensaio de Condutibilidade Térmica

3.4.3.3 Absorção de Água Por Capilaridade

No ensaio de absorção de água por capilaridade segundo a norma ISO 15148 os materiais a ser utilizados são apenas uma balança e um tanque onde seja possível colocar os provetes dentro de água. O ensaio baseia-se na imersão dos provetes em água de forma a ser possível medir a absorção de água, verificando-se pelo aumento do peso ao longo do tempo. Será também necessário fazer a impermeabilização das faces laterais dos provetes com recurso a um pincel de forma a ser avaliada a absorção pela área da base do provete, para isto foi utilizada a tinta impermeabilizante referida na figura, deixando assim apenas a face superior e inferior ao descoberto. Os provetes terão de ter no mínimo 100 cm², sendo assim possível ser efetuado o teste em apenas 3 provetes, devido à norma pedir que sejam efetuados ensaios em 300 cm², caso os provetes não cumpram os 100 cm² de base terão de ser medidos 6 provetes de cada tipo, tendo os nossos provetes mais que 100 cm² de área de base recorreremos então ao primeiro caso. As medições são efetuadas ao longo de 24h, em intervalos de tempo referidos pela norma, que inicialmente são mais curtos, 5 e 20 min, e por fim ficam mais distantes, 8 e 24h, sendo que entre

este último intervalo será necessário efetuar mais um registo de valores, tendo sido efetuado às 23h. Relativamente ao seu procedimento, os provetes terão de ser colocados dentro do tanque apoiados em pequenos suportes de forma a sua base não estar em contacto com a base do tanque, que no nosso caso foram utilizadas pequenas anilhas metálicas para conferir este suporte. Para além disso o nível da água terá de ser 5mm acima da base dos provetes, que caso tivessem bases irregulares seria a distância ao ponto mais alto da base. Antes de se proceder a pesagem do material após ser retirado do tanque será necessário passar a sua base num pano humedecido de forma a retirar os excessos que estejam por fora, com o objetivo apenas avaliar qual o peso de água absorvido pelo provete. Apresentam-se em seguida fotos que representam o procedimento do ensaio que foi utilizado sendo visível a disposição dos provetes utilizada de forma a ser possível manterem sempre alguma distância entre si. Encontra-se descrito o procedimento experimental deste ensaio passo a passo na Figura 40.

De forma a fazer uma análise dos valores de absorção de água por m² de base para ser possível fazer um gráfico com as diferenças de valores associadas a cada um dos provetes e verificar as diferenças causadas entre os tipos de impressão utilizados foi necessário utilizar a seguinte equação:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{(A \times t)} \quad (3)$$

Onde:

C – Índice de absorção capilar (kg/m² s^{1/2});

M₁ – Massa inicial do provete antes da absorção (kg)

M₂ – Massa final do provete da absorção (kg)

A – Área da base do provete (m²)

t – Tempo de absorção (s)



a) Tinta impermeabilizante utilizada



b) Provete Impermeabilizado



c) Disposição de provetes e de anilhas de suporte



d) Altura de água utilizada (5mm)



e) Altura de água utilizada (5mm)



f) Pesagem de provetes

Figura 40 – Absorção de água por capilaridade

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENQUADRAMENTO

Com o objetivo de fazer a caraterização a nível mecânico e higrotérmico do material em questão foi necessário reunir todos os resultados obtidos e analisá-los de forma crítica com o intuito de retirar conclusões. Também foi analisada a influencia da impressão 3D e de seus parâmetros nas caraterísticas higrotérmicas do material. Para isto, foram recolhidos os dados em formatos de tabelas e representados em formato gráfico de forma a tornar mais claras as diferenças existentes entre tipos de provetes.

4.2 ENSAIO DE ESPALHAMENTO

No ensaio de espalhamento foi recolhido o valor medido em duas linhas perpendiculares e o resultado médio dos valores obtidos é considerado o valor de espalhamento. Os valores obtidos após 15 pancadas foram 168 e 172 mm, sendo então considerado o valor 170 mm como valor a retirar deste ensaio. A classe de espalhamento associada ao material é a F1 por ter um valor menor que 340 mm.



Figura 41 – Ensaio de Espalhamento.

4.3 CARATERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste tópico será efetuada a avaliação das propriedades mecânicas testadas ao longo do processo experimental. Cada uma delas será subdividida em duas fases, iniciando pela recolha de dados e em seguida é efetuada análise dos valores obtidos.

4.3.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

De acordo com a norma referida anteriormente, foi possível recolher os dados do equipamento de ensaio no formato de gráfico, sendo apresentado o exemplo do gráfico da resistência aos 28 dias. De forma a ser possível em seguida ser feita a análise dos valores dos provetes foram calculados os valores de resistência à flexão a partir da equação 1.1 sendo resumidos os resultados aos 2,14,21,28 dias, respetivamente, e os fatores estatísticos a si associados nas tabelas

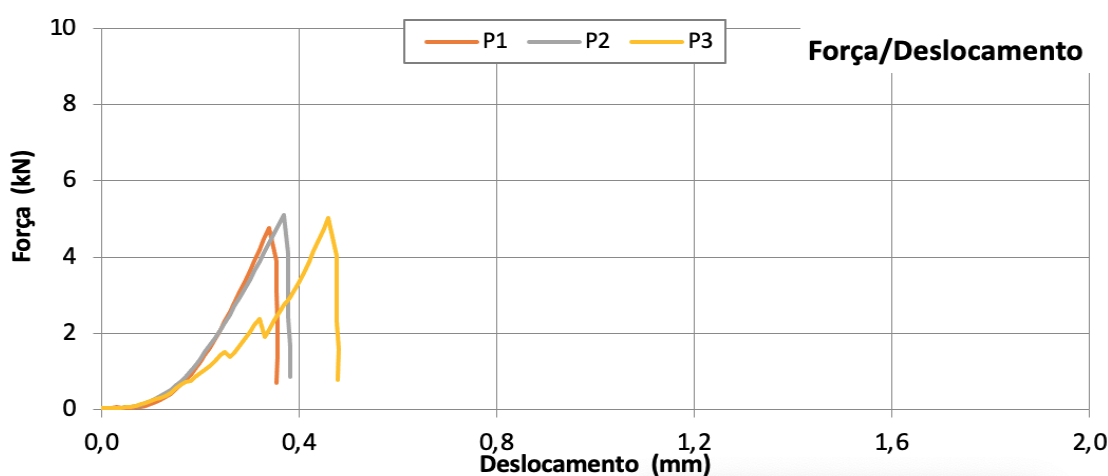


Figura 42 – Gráfico de resistência à flexão aos 28 dias

Com toda a informação recolhida ao longo deste ensaio é possível compilar toda a sua informação numa tabela resumo de forma a ser possível uma análise de resistência ao longo da idade dos provetes. Repara-se que os valores de resistência à flexão são bastante elevados, sendo deste modo a notória a adição das fibras através dos valores de resistência à flexão que são bastante elevados para um betão sem armadura. Situa-se no extremo superior ao intervalo definido anteriormente para este tipo de material, 8-12MPa tornando-se assim vantajoso em relação a outros materiais relativamente a esta propriedade.

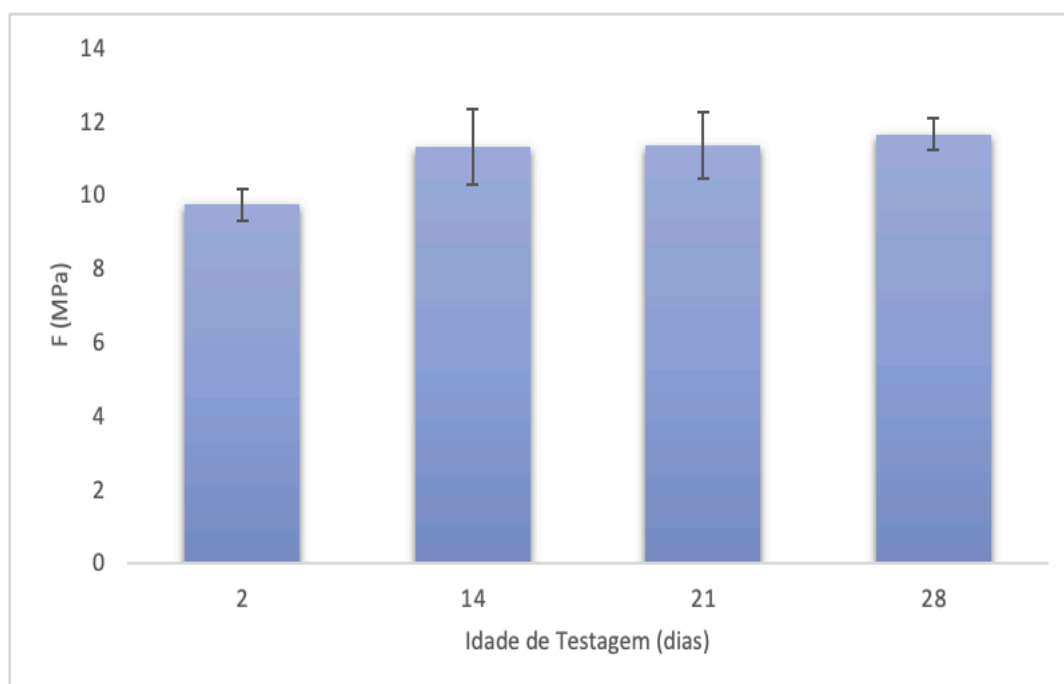


Figura 43 – Gráfico de resistência à flexão

4.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Durante a realização do ensaio de compressão as grandezas que são avaliadas são força e deslocamento, conseguindo assim obter-se um gráfico, sendo apresentado o exemplo para os 28 dias na Figura 44. O valor que é essencial retirar é o da força de rotura do provete que irá ser o pico do gráfico apresentado. Este será então o valor utilizado para os restantes cálculos.

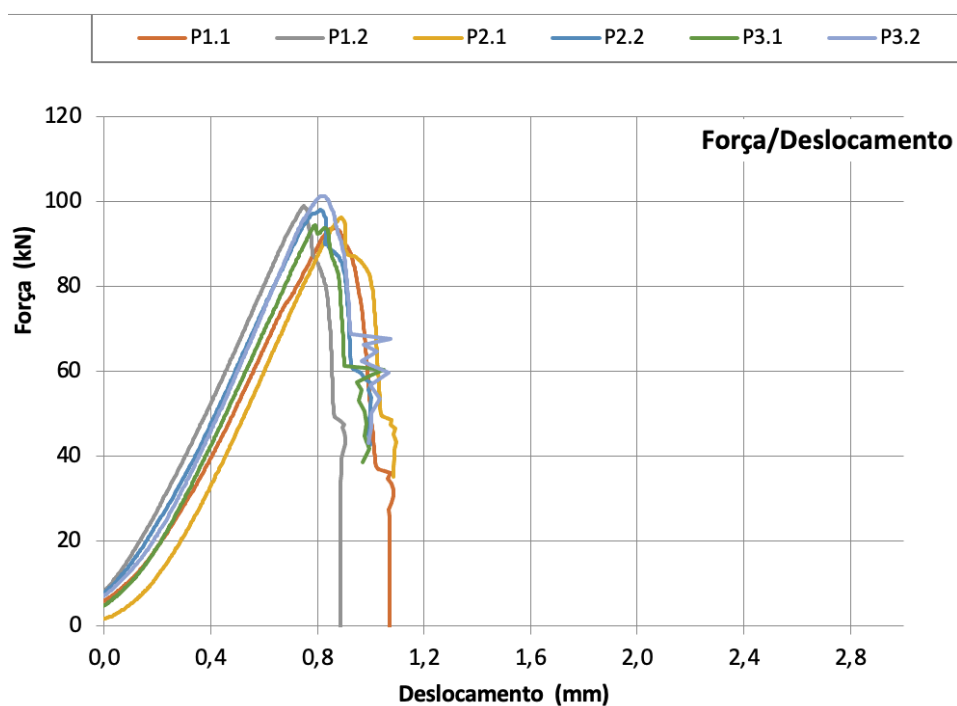


Figura 44 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias

Após recolha de todos os valores relativos a resistências à compressão é possível resumir-se apenas num gráfico de forma a verificar os valores médios de cada grupo de 3 provetes medidos a cada uma das idades de ensaio (Figura 37). Em termos de conclusões consegue-se retirar que:

- Aos 14 dias é evidente um desvio padrão maior, no valor da compressão, devido a um dos provetes ter apresentado um valor discrepante relativamente aos outros. Possivelmente esta discrepância deve-se ao enchimento do molde não ter sido efetuado nas mesmas condições que todos os outros;
- O material apresenta um valor de resistência à compressão aos 28 dias de 61,7 MPa, encontrando-se dentro do intervalo de valores associados a betão estrutural convencional.
- A rotura dos provetes foi adequada, de acordo com a Norma, também devido à presença de fibras.

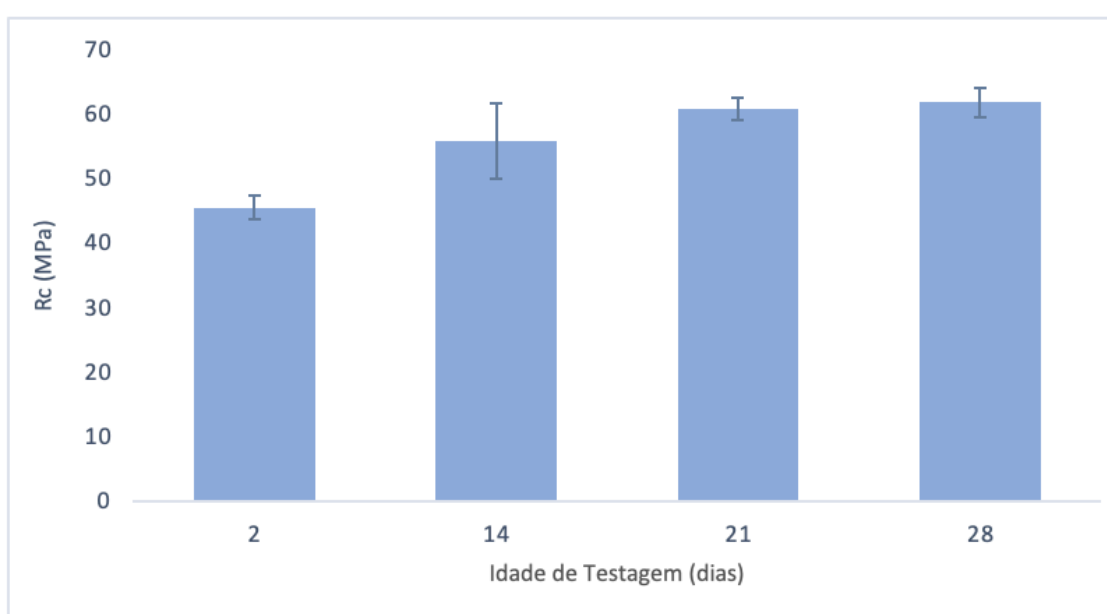


Figura 45 – Gráfico resumo de resistência à compressão

4.4 CARATERIZAÇÃO HIGROTÉRMICA

Ao nível da higrotérmica, optou-se no âmbito deste trabalho pela avaliação da absorção capilar e do valor da condutibilidade térmica.

4.4.1 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Para o ensaio de condutibilidade, descrito anteriormente, foram obtidos os valores apresentados na (Tabela 6) por intermédio do equipamento ISOMET 2114. Os números associados à legenda de cada provete são os que estão referidos no subcapítulo anterior, estando divididos por formato de impressão de forma a verificar se a impressão causa influência nesta propriedade. Para mais clara perceção das diferenças entre os valores, estes foram resumidos em formato gráfico na Figura 46.

Tabela 6 – Registo de valores do ensaio de condutibilidade térmica

Provete	λ (W/(m.K))	Média	Desvio padrão	Calor específico (J/(m3.K))	Média	T média (°C)	Média	ΔT (K)
1,1	2,29			1,90		27,14		9,71
1,2	2,25	2,26	0,02	1,91	1,88	27,56	27,37	9,88
1,3	2,25			1,84		27,42		9,80
2,1	2,19			1,77		27,47		9,70
2,2	2,02	2,14	0,10	1,48	1,63	27,63	27,57	9,78
2,3	2,21			1,64		27,60		9,70
3,1	1,80			1,43		27,45		9,78
3,2	1,99	1,92	0,11	1,70	1,55	27,98	27,88	9,80
3,3	1,98			1,52		28,22		9,78
4,1	2,13			1,55		28,24		9,82
4,2	2,19	2,15	0,04	1,71	1,60	28,17	28,11	9,81
4,3	2,12			1,53		27,93		9,67
5,1	2,15			1,55		27,52		9,83
5,2	2,06	2,07	0,07	1,51	1,52	27,59	27,64	9,76
5,3	2,01			1,48		27,82		9,76

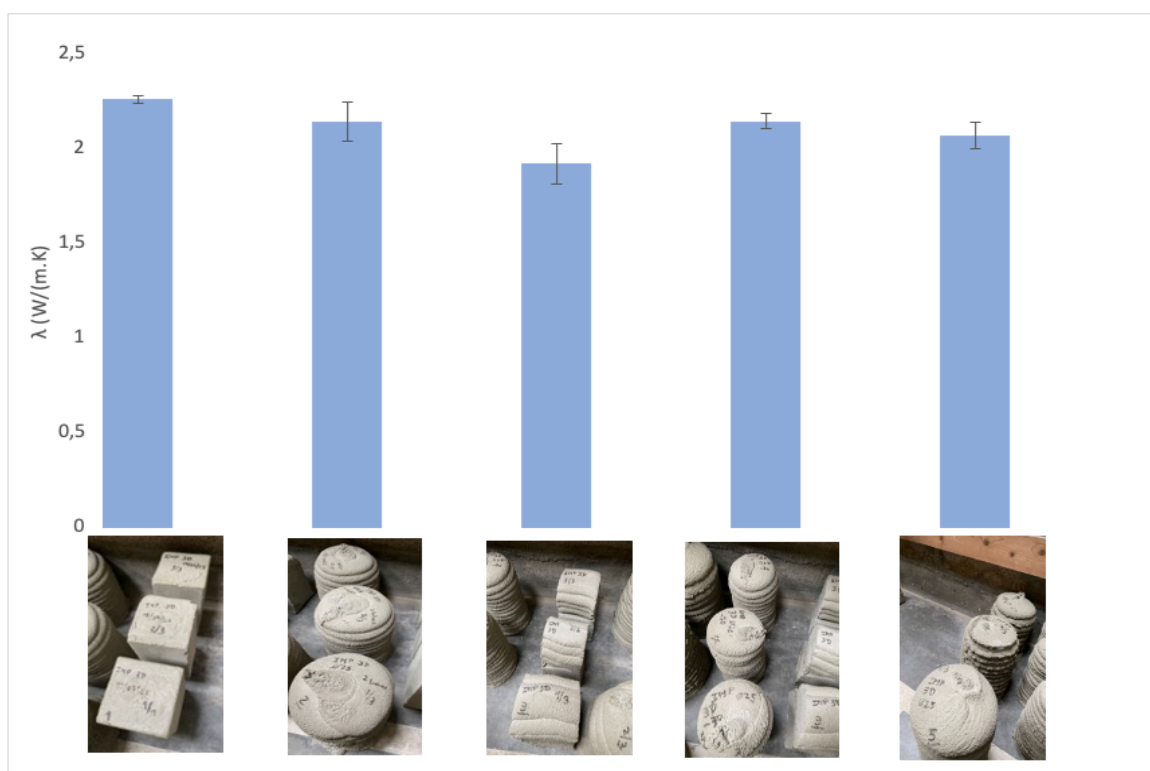


Figura 46 – Gráfico de condutibilidade térmica

Após a recolha dos resultados com recurso ao equipamento ISOMET, é possível retirar-se várias ilações acerca do comportamento térmico do material:

- Verifica-se que o facto de se produzir o provete através de impressão 3D conduz a valores mais baixo ao nível da condutibilidade térmica, quando comparado aos provetes moldados, 2,07 W/(m.K) e 2,26 W/(m.K), respetivamente. Terá assim algumas vantagens ao nível desta propriedade a utilização desta técnica.
- Verifica-se, tal como no estudo referenciado no estado de arte, efetuado por (Markin et al. 2019), que a impressão 3D leva a uma diminuição do valor de condutibilidade térmica (-0,02W/(m K)), apesar de que para o material estudado as diferenças são mais significativas (-0,19W/(m.K.))
- Por outro lado, o valor obtido de condutibilidade térmica nos provetes impressos (2,07 W/(m.K)) de densidade 2267kg/m³ encontra-se acima dos encontrados por (Markin et al. 2019) no estado de arte para betão impresso com densidade de 2100kg/m³ (1,68 W/(m.K)). Esta diferença deve-se à adição de fibras que traz vantagens ao nível de propriedades mecânicas, mas leva a um valor de condutibilidade térmica maior.

4.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

No ensaio de capilaridade foram recolhidos os dados em formato de tabela, sendo importante verificar os valores relativos ao peso dos provetes ao longo do tempo. Os resultados obtidos devem ser expostos num gráfico de $s^{1/2}$ por kg/m² de forma a facilitar o passo seguinte do processo. São também apresentadas as retas de regressão linear para cada um dos provetes, tendo em conta que o valor do coeficiente de capilaridade (C) de cada provete será igual ao declive dessas mesmas retas.

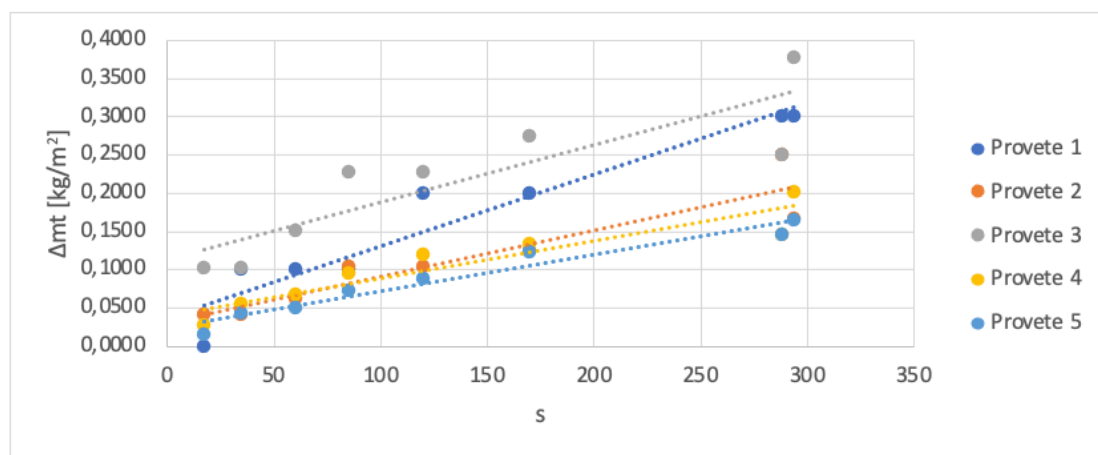


Figura 47 – Gráfico de ensaio de capilaridade

Desse cálculo surgiram os seguintes valores associados a kg de água absorvida por m^2 de base que estão representados na Tabela 7 tendo também a si associados os valores médios e o desvio padrão dos resultados. Será deste modo possível efetuar um gráfico resumo para todos os provetes de forma a compreender a evolução da capilaridade de cada um ao longo do tempo.

Tabela 7 – Valores resumo de ensaio de capilaridade

Provete Ensaiado	C (kg/m ² s ^{1/2})	Formato de Provete	C (kg/m ² s ^{1/2})	Desvio padrão (kg/m ² s ^{1/2})
Provete 1.1	0,0010	Provete 1	0,0010	0,00004
Provete 1.2	0,0010			
Provete 1.3	0,0009			
Provete 2.1	0,0007	Provete 2	0,0005	0,00015
Provete 2.2	0,0005			
Provete 2.3	0,0004			
Provete 3.1	0,0009	Provete 3	0,0009	0,00012
Provete 3.2	0,0008			
Provete 3.3	0,0011			
Provete 4.1	0,0005	Provete 4	0,0005	0,00012
Provete 4.2	0,0007			
Provete 4.3	0,0004			
Provete 5.1	0,0005	Provete 5	0,0005	0,00005
Provete 5.2	0,0005			
Provete 5.3	0,0004			

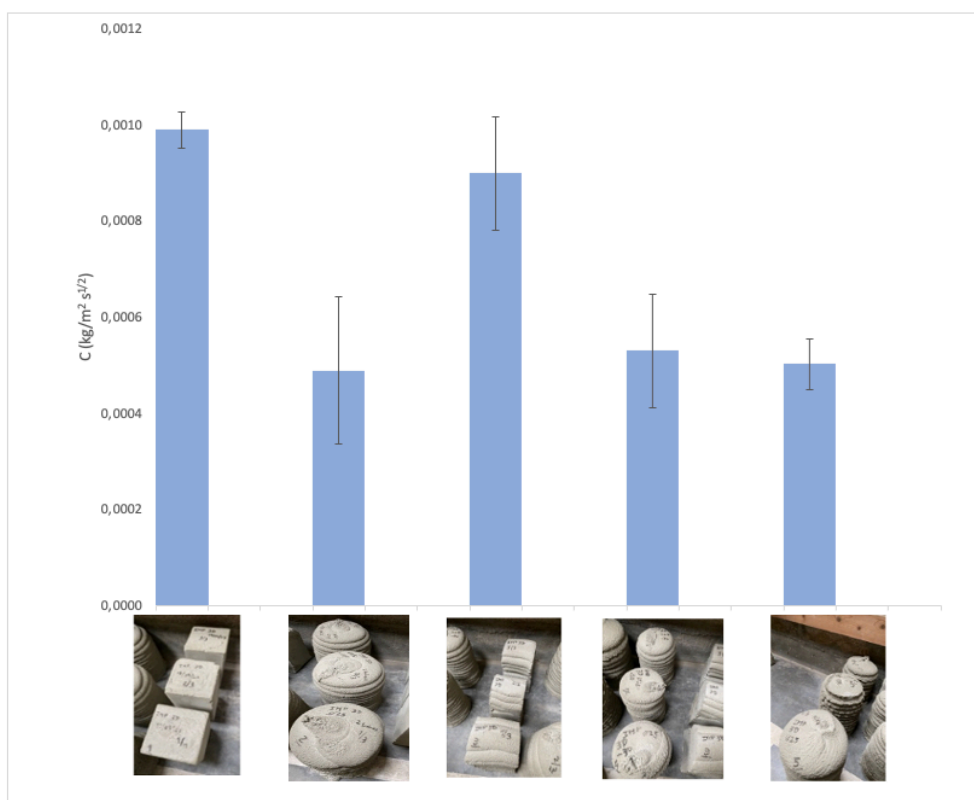


Figura 48 – Gráfico de índice de capilaridade

Será assim então possível fazer uma análise comparativa relativamente aos provetes em questão e dessa análise é possível concluir-se que:

- É de notar que o material tem um ganho de massa baixo tendo valores de índices de absorção de água por capilaridade compreendidos entre $0,0005$ e $0,0010 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$;
- Verifica-se que o valor médio de absorção capilar do material de $0,0007 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$, encontra-se dentro da gama de classificação como “impermeável” associada à norma Alemã DIN 52.617 ($<0,001 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$). Relativamente à classificação francesa o material classifica-se como “revestimento de muito fraca capilaridade” devido a ser menor que $0,0194 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$ de acordo com NF B 10-502 (Sousa 1996)
- Para esta propriedade o uso de impressão 3D revelou um menor coeficiente de capilaridade quando comparado aos provetes moldados, $0,0006$ e $0,0010 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$, respetivamente. Compreende-se então que a absorção de água por capilaridade dos provetes impressos é menor do que os moldados.
- Estes valores comprovam que este material não irá ter problemas de enfraquecimento ou aparecimento fissuras devido à entrada de água no material.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível efetuar uma análise detalhada relativamente ao estado atual da técnica de impressão 3D, entrando de forma detalhada nas suas tecnologias, materiais utilizados e áreas de serviço. Conseguiu-se também verificar as propriedades de misturas utilizadas atualmente para impressão 3D associadas à Engenharia Civil, tal como suas aplicações já existentes.

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade da tecnologia de impressão 3D na construção, verificando a sua influência nas propriedades higrótérmicas do material, foram impressos vários provetes com parâmetros de impressão diferentes de forma a verificar se esta técnica seria vantajosa. Foram obtidos valores favoráveis relativamente à condutibilidade térmica e absorção de água por capilaridade. Os valores de condutibilidade térmica apresentaram uma diminuição de 8,5% quando o material foi produzido com recurso a impressão 3D, tornando-se assim vantajosa a sua utilização. Por outro lado, na capilaridade observa-se uma absorção de água bastante menor, 40% menor, para os provetes impressos estando de acordo com a condutibilidade térmica ao nível de vantagem de utilização, para esta propriedade.

Os parâmetros de impressão também tinham interesse em ser estudados e após a análise detalhada dos ensaios efetuados verifica-se que as variações causadas pelas mudanças de alguns parâmetros de provete para provete em pouco ou nada influenciou os resultados obtidos. Assim, é possível afirmar que, para as propriedades avaliadas, os parâmetros de impressão não têm grande influência nos seus valores físicos, apenas causam ligeiras diferenças.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Relativamente a trabalhos futuros, a nível experimental, sugere-se que para além das propriedades avaliadas neste trabalho sejam avaliadas outras propriedades para a mesma mistura de forma a existir uma caraterização global do material. Exemplificando, ao nível de propriedades mecânicas poderá ser avaliada a durabilidade ou a resistência à tração. Por outro lado, para a higrótérmica poderá ser definido o coeficiente de difusão de vapor. Outros ensaios que dizem respeito a outras áreas experimentais também podem ser conduzidos, como ensaios de reologia, de resistência ao fogo ou resistência gelo-degelo. Em todas estas avaliações possíveis poderão ser alterados os parâmetros de impressão avaliados de forma a ser possível definir um intervalo ótimo para esta mistura.

Por outro lado, no caso de se querer otimizar a mistura, deverá efetuar-se uma avaliação de propriedades com variabilidade de componentes da mistura, tendo em mente as dimensões máximas possíveis dos constituintes da mistura.

Para além disso, pode ser efetuado um estudo de viabilidade económica da utilização desta mistura e deste tipo de técnica construtiva, incluindo todas as fases, desde a construção até à utilização. Poderão deste modo ser verificadas as vantagens e desvantagens que este material pode conferir, quando comparada às tipologias de construção existentes, e em que tipo de projetos poderá ser incluído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, Ghafur H. 2023. 'A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability', *Journal of Building Engineering*, 66: 105863.
- Al-Nimry, Suhair S, and Rawand M Daghmash. 2023. 'Three Dimensional Printing and Its Applications Focusing on Microneedles for Drug Delivery', *Pharmaceutics*, 15: 1597.
- Alaloul, W. S., M. S. Liew, N. A. W. A. Zawawi, and I. B. Kennedy. 2020. 'Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders', *Ain Shams Engineering Journal*, 11: 225-30.
- Alfattni, Rami. 2022. 'Comprehensive Study on Materials used in Different Types of Additive Manufacturing and their Applications', *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7: 92-114.
- Anand, Mukul, and Alok Kumar Das. 2021. 'Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review', *Optics & Laser Technology*, 139: 106914.
- Asadi, I., P. Shafigh, Z. F. B. Abu Hassan, and N. B. Mahyuddin. 2018. 'Thermal conductivity of concrete – A review', *Journal of Building Engineering*, 20: 81-93.
- Baich, Liseli, Guha Manogharan, and Hazel Marie. 2015. 'Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts', *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5: 308-19.
- Bonnard, Renan, Jean-Yves Hascoët, and Pascal Mognol. 2019. 'Data model for additive manufacturing digital thread: state of the art and perspectives', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32: 1170-91.
- Buswell, R. A., W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger. 2018. '3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research', *Cement and Concrete Research*, 112: 37-49.
- Camacho, Daniel Delgado, Patricia Clayton, William J O'Brien, Carolyn Seepersad, Maria Juenger, Raissa Ferron, and Salvatore Salamone. 2018. 'Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review', *Automation in Construction*, 89: 110-19.
- Commission, European. 2021. 'European Construction Sector Observatory: Digitalisation in the Construction Sector'.
- Craveiro, Flávio, José Pinto Duarte, Helena Bartolo, and Paulo Jorge Bartolo. 2019. 'Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0', *Automation in Construction*, 103: 251-67.
- De Schutter, Geert, Karel Lesage, Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Guillaume Habert, and Isolda Agusti-Juan. 2018. 'Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials', *Cement and Concrete Research*, 112: 25-36.
- Denmark, Country. 2021. 'European Construction Sector Observatory'.
- El-Sayegh, S., L. Romdhane, and S. Manjikian. 2020. 'A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20: 34.
- Fonseca, M., and A. M. Matos. 2023. '3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities', *Materials (Basel)*, 16.
- Forcael, E., I. Ferrari, A. Opazo-Vega, and J. A. Pulido-Arcas. 2020a. 'Construction 4.0: A literature review', *Sustainability (Switzerland)*, 12: 1-28.
- Forcael, Eric, Isabella Ferrari, Alexander Opazo-Vega, and Jesús A. Pulido-Arcas. 2020b. 'Construction 4.0: A Literature Review.' In *Sustainability*.
- Gardan, Julien. 2016. 'Additive manufacturing technologies: state of the art and trends', *International Journal of Production Research*, 54: 3118-32.

- Gibson, Ian, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani, Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, and Mahyar Khorasani. 2021. 'Sheet lamination', *Additive Manufacturing Technologies*: 253-83.
- Gibson, Ian, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani, David Rosen, Brent Stucker, and Mahyar Khorasani. 2021. *Additive manufacturing technologies* (Springer).
- Gosselin, C., R. Duballet, Ph Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, and Ph Morel. 2016. 'Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders', *Materials & Design*, 100: 102-09.
- Guimarães, A. S., J. M. P. Q. Delgado, and S. S. Lucas. 2021. 'Advanced manufacturing in civil engineering', *Energies*, 14.
- Hambach, Manuel, and Dirk Volkmer. 2017. 'Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste', *Cement and Concrete Composites*, 79: 62-70.
- Ibrahim, Danilo, Tiago Leonardo Broilo, Claiton Heitz, Marília Gerhardt de Oliveira, Helena Willhelm de Oliveira, Stella Maris Wanderlei Nobre, José Henrique Gomes dos Santos Filho, and Daniela Nascimento Silva. 2009. 'Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet™ models in the reproduction of mandibular anatomy', *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 37: 167-73.
- Ikiz, Serra Utkum. 2021. 'TEAM4UA Plans To Build Europe's First 3D-Printed School In Ukraine'.
- Khoshnevis, Behrokh. 2004. 'Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies', *Automation in Construction*, 13: 5-19.
- Klosterman, Donald, Richard Chartoff, George Graves, Nora Osborne, and Brian Priore. 1998. 'Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29: 1165-74.
- Lesovik, Valery, Roman Fediuk, Mugahed Amran, Arbi Alaskhanov, Aleksandr Volodchenko, Gunasekaran Murali, Valery Uvarov, and Mikhail Elistratkin. 2021. '3D-printed mortars with combined steel and polypropylene fibers', *Fibers*, 9: 79.
- Liu, Kai, Lin Lu, Fang Wang, and Wei Liang. 2017. 'Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete', *Construction and Building Materials*, 148: 465-75.
- Malik, Abrar, Mir Irfan Ul Haq, Ankush Raina, and Kapil Gupta. 2022. '3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges', *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 49: 491-511.
- Markin, V., V. N. Nerella, C. Schröfl, G. Guseynova, and V. Mechtcherine. 2019. 'Material design and performance evaluation of foam concrete for digital fabrication', *Materials*, 12.
- Manikandan, Karthick, Kwangwoo Wi, Xiao Zhang, Kejin Wang, and Hantang Qin. 2020. 'Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing', *Manufacturing Letters*, 24: 33-37.
- Nematollahi, Behzad, Ming Xia, and Jay Sanjayan. 2017. "Current progress of 3D concrete printing technologies." In *ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction*. IAARC Publications.
- Nunes, Sandra, and Carla Costa. 2021. '14 - Self-compacting concrete also standing for sustainable circular concrete.' in Jorge de Brito, Carlos Thomas, César Medina and Francisco Agrela (eds.), *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials* (Woodhead Publishing).
- Oesterreich, Thuy Duong, and Frank Teuteberg. 2016. 'Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry', *Computers in Industry*, 83: 121-39.
- Pan, Yue, and Limao Zhang. 2021. 'Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends', *Automation in Construction*, 122: 103517.

- Parupelli, SantoshKumar, and Salil Desai. 2019. 'A comprehensive review of additive manufacturing (3d printing): processes, applications and future potential', *American journal of applied sciences*, 16.
- Pessoa, S, Ana Sofia Guimarães, Sandra S Lucas, and N Simões. 2021a. '3D printing in the construction industry-A systematic review of the thermal performance in buildings', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141: 110794.
- Pessoa, S., A. S. Guimarães, S. S. Lucas, and N. Simões. 2021b. '3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141: 110794.
- Real, Sofia, José Alexandre Bogas, Maria da Gloria Gomes, and Beatriz Ferrer. 2016. 'Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete', *Magazine of Concrete Research*, 68: 798-808.
- Robayo-Salazar, Rafael, Ruby Mejía de Gutiérrez, Mónica A. Villaquirán-Caicedo, and Silvio Delvasto Arjona. 2023. '3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector', *Automation in Construction*, 146: 104693.
- Rouf, Saqib, Abrar Malik, Navdeep Singh, Ankush Raina, Nida Naveed, Md Irfanul Haque Siddiqui, and Mir Irfan Ul Haq. 2022. 'Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications', *Sustainable Operations and Computers*, 3: 258-74.
- Şahin, Hatice Gizem, and Ali Mardani-Aghabaglou. 2022. 'Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review', *Construction and Building Materials*, 316: 125865.
- Savini, A., and G. G. Savini. 2015. "A short history of 3D printing, a technological revolution just started." In *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*, 1-8.
- Schwab, Klaus. 2017. *The fourth industrial revolution* (Currency).
- Sousa, José Manuel Martins Soares de. 1996. 'Caracterização da capilaridade de revestimentos de fachada'.
- Talebi, Hamed Rezaei, Brit Anak Kayan, Iman Asadi, and ZFBA Hassan. 2020. 'Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes', *J. Environ. Treat. Tech*, 8: 908-14.
- Teixeira, João, Cecília Ogliari Schaefer, Bárbara Rangel, J Lino Alves, Lino Maia, Sandra Nunes, Rui Neto, and ML Lopes. 2021. '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*, 235: 1419-29.
- Vaezi, Mohammad, Srisit Chianrabutra, Brian Mellor, and Shoufeng Yang. 2013. 'Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review', *Virtual and Physical Prototyping*, 8: 19-50.
- Venkata Siva Rama Prasad, C. 2022. "3D Concrete Printing Technology Current Progress and Future Perspective: A State-of-the-Art Review." In *Lecture Notes in Civil Engineering*, 27-39.
- Wangler, Timothy, Nicolas Roussel, Freek P. Bos, Theo A. M. Salet, and Robert J. Flatt. 2019. 'Digital Concrete: A Review', *Cement and Concrete Research*, 123: 105780.
- Zahabizadeh, B., V. M. C. F. Cunha, J. Pereira, and C. Gonçalves. 2019. "Development of cement-based mortars for 3D printing through wet extrusion." In *IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management - Report*, 540-47.
- Zhou, Yiyi, Dan Jiang, Rahul Sharma, Yi Min Xie, and Amardeep Singh. 2023. 'Enhancement of 3D printed cementitious composite by short fibers: A review', *Construction and Building Materials*, 362: 129763.

A1

**Anexo 1- Resultados Ensaio à
Flexão**

Tabela 8- Resistência à flexão aos 2 dias

Provete	Resistência à flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1	9,40	9,73	0,43	4,4%
P2	9,57			
P3	10,22			

Tabela 9 - Resistência à flexão aos 14 dias

Provete	Resistência à flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1	12,48	11,31	1,02	9,0%
P2	10,80			
P3	10,66			

Tabela 10 - Resistência à flexão aos 21 dias

Provete	Resistência à flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1	10,37	11,34	0,89	7,9%
P2	11,55			
P3	12,12			

Tabela 11 - Resistência à flexão aos 28 dias

Provete	Resistência à flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1	11,19	11,65	0,41	3,5%
P2	11,97			
P3	11,79			

A2

Anexo 2- Resultados Ensaio à Compressão

Tabela 12 – Resistência à compressão aos 2 dias

Provete	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1.1	47,26	45,36	1,83	4,0%
P1.2	46,49			
P2.1	45,84			
P2.2	44,67			
P3.1	42,05			
P3.2	45,85			

Tabela 13 - Resistência à compressão aos 14 dias

Provete	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1.1	60,29	55,76	5,90	10,6%
P1.2	60,56			
P2.1	58,77			
P2.2	58,45			
P3.1	47,57			
P3.2	48,89			

Tabela 14 - Resistência à compressão aos 21 dias

Provete	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1.1	58,52	60,69	1,80	3,0%
P1.2	61,87			
P2.1	60,18			
P2.2	61,26			
P3.1	59,02			
P3.2	63,29			

Tabela 15 - Resistência à compressão aos 28 dias

Provete	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Desvio padrão (%)
P1.1	61,57	61,73	2,27	3,7%
P1.2	58,32			
P2.1	61,34			
P2.2	65,07			
P3.1	63,19			
P3.2	60,91			

A3

Anexo 3- Resultados Ensaio de Capilaridade

Tabela 16 – Massa dos provetes ao longo do ensaio de capilaridade

Proвете	Massa dos Provetes (g)							
	massa seca	5 min depois	20 min	1h	2h	4h	8h	24h
1.1	4535	4536	4536	4536	4536	4537	4537	4539
1.2	4534	4534	4534	4534	4534	4534	4535	4537
1.3	4348	4348	4349	4349	4349	4350	4350	4351
2.1	6328	6330	6332	6333	6335	6336	6337	6340
2.2	7799	7800	7800	7802	7802	7804	7805	7807
2.3	8092	8094	8094	8095	8097	8097	8098	8099
3.1	4264	4265	4265	4266	4267	4267	4268	4269
3.2	3135	3136	3136	3137	3138	3138	3138	3139
3.3	3518	3520	3520	3520	3521	3521	3522	3524
4.1	4384	4385	4385	4386	4387	4388	4388	4389
4.2	4700	4701	4702	4702	4703	4703	4704	4706
4.3	4527	4527	4528	4528	4528	4529	4529	4531
5.1	8811	8812	8813	8813	8814	8816	8817	8818
5.2	9614	9614	9615	9616	9617	9616	9619	9622
5.3	8811	8812	8814	8814	8815	8816	8817	8819