U.PORTO

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO

Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios

João Hildeberto Silva Teixeira

M

2018

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

Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios

João Teixeira

1ª Versão

Dissertação realizada no âmbito do

Mestrado em Design Industrial e de Produto

Orientador: Prof. Dr. Jorge Lino

Coorientador: Prof. Dr. Bárbara Rangel

Coorientador: Prof. Dr. Sandra Nunes

Porto, 2018

© João Teixeira, 2018

U.PORTO

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutor Rui Mendonça

PROFESSOR AUXILIAR DA FACULDADE DE BELAS ARTES DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutor Fernando Jorge Lino Alves

PROFESSOR ASSOCIADO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutor Filipe José Palhares Chaves

PROFESSOR ADJUNTO CONVIDADO DA ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
DO INSTITUTO POLITÉCNICO DO CÁVADO E DO AVE

19

16 NOVEMBRO 2018

MESTRE João Teixeira
MDIP/**59**

Resumo

A impressão 3D é uma tecnologia emergente nas mais diversas áreas industriais. A possibilidade de deposição incremental de material, somente onde é necessário, permite obter formas de grande complexidade sem desperdício de material e sem recurso a moldes. Apesar destas vantagens para a indústria de construção civil, as limitações impostas por normas de segurança condicionam a sua implementação, no entanto a utilidade para o design é imediata e pode ser explorada na conceção de peças complexas e personalizáveis.

O desenvolvimento desta tecnologia por extrusão de material tem aumentado nos últimos anos com o aparecimento de várias empresas, alguns projetos privados, assim como o envolvimento de universidades. Por se dispensar o uso de cofragem, um dos aspetos críticos é o ajuste das propriedades do material no estado fresco às exigências da impressão 3D.

Desenvolveram-se argamassas para a utilização na impressão 3D por via de extrusão. Para tal, foi feita a otimização de um sistema de extrusão, assim como o desenvolvimento de 3 tipos de argamassas. Inicialmente foi feita a caraterização das argamassas durante as primeiras idades, tendo como objetivo a escolha da melhor argamassa para impressão. Seguiu-se a impressão de provetes para avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade em relação a provetes fabricados com recurso a moldes.

Por último realizou-se a impressão de várias peças que demonstraram, de formas distintas, a utilidade da tecnologia para impressão.

Palavras-chave

Impressão 3D, Materiais Cimentícios, Extrusão, Design.

Abstract

3D printing is one of the today's rising technologies, and it can be used in a very wide variety of industries. Being able to incrementally deposit different materials in some very specific positions, opens the possibility to create complex structures without any kind of mold or waste that is usually related to this process. Though considering that this new technology can't be used in some industries for safety reasons, as for example the construction sector, it is already a huge improvement in other areas such as design, where it provides a whole new way of producing complex and personalized products.

The development of 3D printing by material extrusion is suffering a great evolution, due to the investment done in it by some new companies or even by some research projects in specific universities. By turning the use of formwork obsolete, we have made the process of adapting the properties of the used raw material to the requirements of the 3D printing, one of the critical processes of production.

Mortars were developed to be used in 3D printing by material extrusion. For this, the extrusion system was optimized and, in parallel, were developed three types of mortars. Characterize the mortars during the initial phase was the first step to choose which one was the better to use in the printer. Then some prototypes were printed so their durability and mechanicals characteristics could be tested when compared to the ones that were produced with molds.

At last, some products were printed to show, in different ways, how useful this technology can be.

Key words

3D Printing, Cementitious Materials, Extrusion, Design.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de expressar o meu sincero e profundo agradecimento ao professor Jorge Lino pela sua orientação, rigor, empenho, motivação e disponibilidade.

À professora Sandra Nunes pelo interesse demonstrado em coorientar este trabalho, pelos ensinamentos imprescindíveis, pela dedicação e por toda a disponibilidade. Um contributo importantíssimo para a realização deste trabalho.

À professora Bárbara Rangel por todas as opiniões, críticas e pela forma amiga com que sempre me incentivou.

Ao professor Rui Neto pela disponibilidade, pelas soluções apresentadas e pela ajuda preciosa em todo o trabalho prático.

Agradecimento ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e ao Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

Quero ainda agradecer ao pessoal técnico do Laboratório de Estruturas da FEUP, em especial à Engenheira Paula e ao Cláudio que sempre mostraram disponibilidade e amizade.

À Cristina, à Sara, à Helena pela amizade, ajuda e carinho.

Por último e com grande carinho, a toda a minha família que sempre me motivou, ajudou, e por todas as oportunidades dadas ao longo de toda a minha vida.

Presto ainda os meus sinceros agradecimentos a todos os que direta e indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

Índice

Resumo v

Abstract vii

Agradecimentos ix

Índice xi

Lista de Figuras xv

Lista de Tabelas xxv

Acrónimos xxvii

Símbolos xxix

1. Introdução 1

1.1. Considerações Gerais 1

1.2. Objetivos 2

1.3. Metodologia 3

1.4. Estrutura 4

2. Estado da Arte 5

2.1. Impressão 3D 6

2.2. Impressão 3D com Materiais Cimentícios 10

2.3. Tecnologias de Impressão 3D com Materiais Cimentícios 15

2.3.1. Processos de Impressão com Material em Grão 16

2.3.1.1. Joseph Pegna 17

2.3.1.2. D-Shape 17

2.3.2. Processos de Impressão por Extrusão de Material 19
2.3.2.1. DUS ARCHITECTS 20
2.3.2.2. Contour Crafting 21
2.3.2.3. Loughborough University 24
2.3.2.4. Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC) 26
2.3.2.5. WinSun Company 28
2.3.2.6. HuaShang Tengda 3D Printing System 31
2.3.2.7. BetAbram 33
2.3.2.8. CyBe 35
2.3.2.9. XtreeE 39
2.3.2.10. Bruil 42
2.3.2.11. Wasp 44
2.3.2.12. Andrey Rudenko 47
2.3.2.13. Alex LeRoux 51
2.3.2.14. Apis Cor 53
2.3.2.15. Constructions-3D 56
2.3.2.16. 3D Printhuset 59
2.3.2.17. TU Eindhoven 61
2.3.2.18. Lund University 62
2.4. Composições de Argamassas para Impressão 64
2.5. Análise / Reflexão 65
3. Caso de Estudo 69
3.1. Sistema de Extrusão 70
3.1.1. Otimização do Extrusor 73
3.1.2. Limitações 76

3.2. Material 78
3.2.1. Requisitos de Desempenho para a Impressão 78
3.2.2. Fatores que Influenciam a Impressão 79
3.2.2.1. Composição das Argamassas para Impressão 80
3.2.2.2. Testes de Impressão Manual 82
3.2.3. Evolução das Propriedades da Argamassa ao Longo do Tempo 84
3.2.3.1. Ensaio de Espalhamento 84
3.2.3.2. Filamentos Impressos ao Longo do Tempo 86
3.3. Ensaios Mecânicos 92
3.3.1. Impressão e Preparação dos Provetes 93
3.3.2. Ensaio à Flexão 96
3.3.3. Ensaio à Compressão 98
3.4. Absorção de água por Capilaridade 102
3.5. Conclusões 106

4. Peças Impressas 109
4.1. Peça de Geometria Ortogonal 110
4.2. Peças de Geometria Cilíndrica 112
4.2.1. Torre Cilíndrica 113
4.2.2. Peça Final 116
4.3. Impressão com Material de Suporte 118

5. Conclusões 123

6. Limitações e Trabalhos Futuros 125

7. Referências 127

8. Anexos 135
Anexo A – Desenhos técnicos 135

Anexo B – Medição dos filamentos.....141

Anexo C – Poster MDA.....142

Anexo D – Artigo CONSTRUÇÃO 2018.....143

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Desenho tridimensional, obtido através de modelação em 3DS MAX (Lehtinen 2007)..... 6

Figura 2.2 – Digitalizadores 3D, modelo Sense–RS da 3D Systems e Eva–M da Artec, respetivamente..... 6

Figura 2.3 - Processo de impressão em estereolitografia (adaptado de Informa USA 2015). 7

Figura 2.4 - Impressão em estereolitografia (AstroScience 2017).....7

Figura 2.5 - Etapas fundamentais durante um processo de fabricação aditiva (adaptado de khorram niaki e Nonino 2015)..... 8

Figura 2.6 - Constituição de uma impressora FDM (adaptado de University. 2018b)..... 9

Figura 2.7 – Peça impressa por impressora FDM (3Dnatives 2018). 9

Figura 2.8 – Constituição de uma impressora por "Binder Jetting" (adaptado de University. 2018a).....10

Figura 2.9 – Peça impressa pelo método de impressão "Binder Jetting", com pós metálicos (Sculpteo 2018).....10

Figura 2.10 – Casa da Música Porto, Portugal.....11

Figura 2.11 - Cofragem do edifício MAXXI - Museo nazionale delle arti del XXI secolo, Italy (Coffrages, 2003-2009). 12

Figura 2.12 - Conjunto de bancos fabricados com recurso a cofragem (ranchoavellanas.com 2018b); banco fabricado com recurso a cofragem (ranchoavellanas.com 2018a), respetivamente.....12

Figura 2.13 - Gráfico com a repartição de custos de uma construção em betão (adaptado de Nemati 2007).....13

Figura 2.14 – Basílica da Sagrada Família (Daudé 201?).....14

Figura 2.15 – Torre Einstein (Arlt. 2018).....14

Figura 2.16 – First Goetheanum (www.goetheanum.org 2005).....14

Figura 2.17 –Conceitos de impressão 3D abordados durante a revisão da literatura.....16

Figura 2.18 - Diagrama do processo de impressão proposto por J. Pegna (Pegna, 1997).....17

Figura 2.19 – Impressora em processo de impressão, D-Shape (BuiltWorlds Voices 2016).....18

Figura 2.20 - Processo de extração do material em excesso na peça "Radiolaria" (Peerless Media 2012).....18

Figura 2.21 - Peça impressa pelo processo D-Shape, intitulada "Radiolaria" (BEYOND 2015).....18

Figura 2.22 - Ponte pedonal em Alcobendas, Madrid, com 12 m de comprimento e 1,75 m de largura (BEYOND 2015).....19

Figura 2.23 - Impressora 3D Kamermaker (Punchbowl Media 2016), banco Impresso pela impressora Kamermaker (decoist.com 2008).....21

Figura 2.24 – Projeto 3D Print Canal House (Simply Amsterdam 2018).....21

Figura 2.25 – Extrusor com triplo bocal em processo de impressão de uma parede, com reforço interior (Hewitt, 2010).....22

Figura 2.26 - Impressão de parede ortogonal e obliqua, respetivamente, mostrando a versatilidade dada pela espátula no momento de impressão (Fabbaloo 2014).....22

Figura 2.27 - Impressão de uma parede circular, através da tecnologia de impressão CC (AUTODESK 2015), protótipo de base Marciana/Lunar, impressa pela tecnologia CC (Contour Crafting Corporation 2017), render de possível uso da tecnologia CC na

construção espacial (AUTODESK, 2015), respetivamente. 23

Figura 2.28 - Impressora utilizada pela Universidade de Loughborough (Lim et al. 2011). 25

Figura 2.29 – Elemento impresso pela Universidade de Loughborough (concreteprinting 2010). 25

Figura 2.30 - Elemento arquitetónico impresso pela Universidade de Loughborough (Loughborough University 2018; Lim et al. 2011). 25

Figura 2.31 - Pormenor dos vazios do elemento impresso na figura 2.29 (Lim et al. 2011). 25

Figura 2.32 - Robô "Grip Robot" durante processo de impressão. Dimensões de 400x400x300 mm (IAAC 201?). 27

Figura 2.33 - Robô "Vacuum Robot" em processo de impressão. Dimensões de 270x300x120 mm (Stereotactil 2015). 27

Figura 2.34 – Processo de impressão, com destaque para o mecanismo de armazenamento e transporte de material (IAAC 201?). 27

Figura 2.35 - Robô "Base Robot" durante processo de impressão, com as dimensões de 270x300x120 mm (Stereotactil, 2015). 27

Figura 2.36 – Pormenor da impressora WinSun (Caxin 2015). 28

Figura 2.37 - Processo de impressão da WinSun Company (Caxin 2015). 28

Figura 2.38 - Parte de uma parede impressa pela WinSun (Caxin, 2015). 29

Figura 2.39 - Elemento decorativo impresso pela WinSun (Doris, 2018). 29

Figura 2.40 - Interior de uma habitação impressa em betão (Matjaz Tanc Ic). 29

Figura 2.41 - Pequena construção totalmente impressa em materiais cimentícios (Doris 2018). 30

Figura 2.42 - Habitação impressa pela WinSun (New China TV 2014). 30

Figura 2.43 – Impressora e pormenor do extrusor desenvolvido pela HuaShang Tegda (New China TV 2016).....31

Figura 2.44 - Habitação impressa em betão, no local de construção, durante 45 dias pela HuaShang Tengda (Scott 2016),..... 32

Figura 2.45 - Habitação anterior devidamente acabada (Tengda, 2016). 32

Figura 2.46 – Modelo de impressora, BetAbram (BetAbram, 2016b). 34

Figura 2.47 – Bocal redondo em processo de impressão (betabram_videos 2015). 34

Figura 2.48 - Impressão com o uso do bocal quadrado, onde é visível o uso das espátulas no acabamento lateral (Ribic 2018). 34

Figura 2.49 - Impressão de uma peça com o auxílio de um material de suporte (betabram videos, 2017). 35

Figura 2.50 - Processo de impressão 3D com materiais cimentícios (CyBe Construction 2014)..... 35

Figura 2.51 - Impressora CyBe R 3Dp (CyBe Construction 2014)..... 36

Figura 2.52 - Parede impressa pela impressora R 3Dp (CyBe Construction 2014). 36

Figura 2.53 - Impressora RC 3Dp (CyBe Construction 2014).....37

Figura 2.54 - Ensaio de abaixamento com o material CyBe Mortar (CyBe Construction 2014). 38

Figura 2.55 - Redrone Laboratory, edifício de desenvolvimento e produção de Drones, impresso pela impressora CyBe RC 3Dp (CyBe Construction 2017e)..... 38

Figura 2.56 - Exterior e interior, respetivamente, da 3D House 05 | Villa impressa em Milão para a Design Week 2018 pela impressora CyBe RC 3Dp (CyBe Construction 2018)..... 39

Figura 2.57 - Processo de impressão da XtreeE (Seaboost Artificial reefs 2018). 40

Figura 2.58 - Protótipos de painéis para fachadas (XtreeE | the large scale 3D 2018a)..... 41

Figura 2.59 - Recife artificial impresso pela tecnologia de impressão 3D em betão da XtreeE (XtreeE | the large scale 3D 2017) 41

Figura 2.60 - Braço da impressora Bruil em processo de impressão (Bruil 2017)..... 43

Figura 2.61 - Pormenor que demonstra a alta resolução de impressão da tecnologia Bruil (Bruil 2017)..... 43

Figura 2.62 – Peça impressa com o uso de várias cores (Alec 2016b)..... 43

Figura 2.63 – Peça impressa com o uso de gradiente (Alec 2016b)..... 43

Figura 2.64 - Peça impressa com o uso de gradiente (Alec 2016b)..... 44

Figura 2.65 - Extrusor da impressora Delta Big 66 (WASP 2017a)..... 45

Figura 2.66 - Processo de abastecimento do extrusor da Delta Big 66 (WASP 2017a)..... 45

Figura 2.67 - Processo de amassadura do material (WASP, 2017c)..... 46

Figura 2.68 - Bocal de extrusão, impressora Big Delta 66 (WASP, 2017d)..... 46

Figura 2.69 - Colocação de estrutura em madeira para suportar o telhado (WASP, 2017d)..... 46

Figura 2.70 - Imagem final da habitação Eremo (WASP, 2017d)..... 46

Figura 2.71 - Impressor Delta Big Wasp 66 (WASP 2017c). 47

Figura 2.72 - Areia utilizada na elaboração da argamassa (Rudenko 2015)..... 49

Figura 2.73 - Impressora Stroybot em processso de impressão no interior (Rudenko, 2015)..... 49

Figura 2.74 – Extrusor da impressora Stroybot em processo de impressão no exterior (Rudenko, 2015)..... 49

Figura 2.75 - Castelo impresso em betão por Andrey Rudenko (Kustom 201?-a). 49

Figura 2.76 - Topo das torres do castelo antes da sua montagem no edifício (Rudenko 2014a)..... 49

Figura 2.77 - Pormenor da impressão de um jacuzzi no interior do hotel junto com parte da sua estrutura..... 50

Figura 2.78 - Impressora V2 Vesta 3D em processo de impressão no exterior, e habitação impressa (Alec 2016a). 52

Figura 2.79 - Impressora apis cor (apis cor 2016b)..... 54

Figura 2.80 - Pormenor de parede impressa pela apis cor, com um filamento de reforço no interior (apis cor, 2016d). 54

Figura 2.81 - Pormenor de uma camada destinada à impressão de uma habitação, com um filamento externo que serve para isolamento (apis cor 2017b)..... 54

Figura 2.82 - Peça impressa com novos materiais desenvolvidos pela apis cor (apis cor, 2017a)..... 55

Figura 2.83 - Processo de construção, exterior e interior da habitação, respetivamente (apis cor 2017a). 55

Figura 2.84 - Esquema que demonstra o alcance de uma impressora apis cor, assim como a possibilidade de trabalhar em conjunto com outra impressora apis cor (apis cor, 2017a) 56

Figura 2.85 - Impressora 3D Construtor (Construtions-3D 2018a)..... 57

Figura 2.86 - Modo de precisão máxima e volume máximo da impressora 3D Construtor, respetivamente (Construtions-3D 2018c). 57

Figura 2.87- Vista de todos os componentes necessários para realizar uma impressão (controlador, impressora, silo e mecanismo de mistura e transporte), no valor de 495 000 € (Construtions-3D 2018d). 58

Figura 2.88 - Recife, 80x70x60 cm, 250 kg, camadas de 20 mm de altura impressa em 32 min (Construtions-3D 2018b)..... 59

Figura 2.89 - Banco urbano, 200x80x50 cm, 450 kg, camadas de 20 mm de altura, impresso em 55 min (Construtions-3D 2018b).....59

Figura 2.90 - Cadeira urbana, 80x70x60 cm, 110 kg, camadas com a altura de 15 mm, impresso em 14 minutos (Construtions-3D 2018b).....59

Figura 2.91 - Protótipo de parede, 150x30x90 cm, 550 kg, camadas com altura de 10 mm, impresso em 1h03 (Construtions-3D 2018b).....59

Figura 2.92 - Pormenor do bocal com aresta dentada (Printhuset 2017a), extrusor com parafuso de Arquimedes, da impressora BOD2-483 (Printhuset, 2017b), imagem da impressora BOD2 em processo de impressão (Printhuset, 2017a).....60

Figura 2.93 - Construção do edifício BOD e render da construção final, respetivamente (Printhuset 2017a).....61

Figura 2.94 – Instalação da ponte no local da obra (TU/e 2018a).....62

Figura 2.95 - Extrusor com pormenor da entrada lateral para admissão de material, estrutura completa da impressora e um conjunto de cadeiras impressas pela tecnologia, respetivamente (Anell 2015).....63

Figura 3.1 – Organograma representativo do trabalho experimental.....70

Figura 3.2 – Componentes do sistema de extrusão.....71

Figura 3.3 - Mesa de impressão utilizada durante o presente trabalho.....73

Figura 3.4 – Pormenor dos atuadores pneumáticos no extrusor fabricado, devidamente acoplado ao sistema de extrusão.....74

Figura 3.5 – Vista explodida com componentes do novo extrusor.....75

Figura 3.6 – Alterações na otimização do extrusor fabricado e existente, respetivamente.....75

Figura 3.7 – Corte longitudinal do extrusor otimizado.....76

Figura 3.8 – Operadores necessários durante o processo de impressão. O operador 1 é responsável pelo

controlo do pistão e pelos movimentos da mesa de impressão, o operador 2 pelo controlo da vibração e pela abertura e fecho do bocal, e o operador 3, que não se encontra na imagem, é responsável pela troca de azulejos com os filamentos impressos por azulejos vazios, assim como o registo dos tempos de impressão. 77

Figura 3.9 - Bloqueio inicial do bocal com fita-cola, seguido do bloqueio manual com uma colher, momentos antes da impressão. 78

Figura 3.10 – Fatores que influenciam a qualidade da impressão, adaptado de Ma, Li, e Wang (2018). 80

Figura 3.11 - Materiais constituintes das argamassas projetadas e misturadora para argamassas com capacidade para 10l, modelo 16-B 0072 da marca Constrols. 82

Figura 3.12 - Processo de amassadura da argamassa. 82

Figura 3.13 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 1. 83

Figura 3.14 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 2. 83

Figura 3.15 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 3. 83

Figura 3.16 – Molde metálico tronco-cónico utilizado no ensaio de espalhamento. 84

Figura 3.17– Resultados dos ensaios de espalhamento. 85

Figura 3.18 – Ensaio aos 3:00 e aos 25:00 minutos, respetivamente. 86

Figura 3.19 – Largura do bocal (a) e altura face à mesa de impressão (h). 86

Figura 3.20 – Esquema de medição para a média da largura dos filamentos. 87

Figura 3.21 – Espalhamentos ao longo do tempo, filamentos impressos com bocal de 43 mm a 30 mm de altura da mesa de impressão. 88

Figura 3.22 – Largura dos filamentos da figura 3.18. 88

Figura 3.23 – Vista lateral do filamento l. 89

Figura 3.24 – Evolução da largura dos filamentos impressos sem fibras e com bocal de 23 mm a uma altura de 20 mm. 90

Figura 3.25 – Curva com a largura dos filamentos impressos sem fibras e com bocal de 23 mm. 90

Figura 3.26 – Filamentos impressos ao longo do tempo, impressos com bocal de 23 mm e com fibras metálicas de 6 mm..... 91

Figura 3.27 – Curva com largura dos filamentos impressos com fibras de 6mm, com o bocal de 23 mm à altura de 20 mm. 91

Figura 3.28 – Resultados dos ensaios da Figura 3.17 e 3.19. 92

Figura 3.29 – Prensa universal Instron 300 DX em ensaio de compressão, ... 93

Figura 3.30 – Medidas provetes de referência, moldados. 93

Figura 3.31 – Modelação 3D e fotografias do bocal retangular, impresso, utilizado na impressão dos provetes, respetivamente..... 94

Figura 3.32 – Impressão dos provetes para ensaio mecânico..... 94

Figura 3.33 – Provete impresso para ensaios mecânicos, com fibras de 6mm..... 95

Figura 3.34 – Provete impresso para ensaios mecânicos, com fibras de 6mm, depois do corte das laterais. 95

Figura 3.35 – Média dos resultados obtidos nos ensaios à flexão. 97

Figura 3.36 – Ensaio à flexão em provete impresso com fibras metálicas de 13mm..... 98

Figura 3.37 – Provetes durante ensaios à compressão argamassa A e argamassa C, respetivamente. 99

Figura 3.38 – Valores médios obtidos nos ensaios à compressão..... 101

Figura 3.39 – Provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade. 103

Figura 3.40 – Retas de ajuste dos resultados com os provetes impressos.....103

Figura 3.41 – Retas de ajuste dos resultados dos provetes moldados com a argamassa B.....104

Figura 3.42 – Retas de ajuste dos resultados dos provetes moldados com a argamassa C.....104

Figura 4.1 – Peça impressa com sobreposição de camadas. 110

Figura 4.2 – Corte da peça impressa anteriormente, Figura 4.1.....111

Figura 4.3 – Esquema que representa os vazios de uma impressão com menor ou maior compactação, respetivamente.....112

Figura 4.4 – Esquema com os componentes utilizados para o acoplamento da mesa giratória. 113

Figura 4.5 – Montagem e teste da mesa giratória.....113

Figura 4.6 – Esquisso com planeamento da impressão da torre. 114

Figura 4.7 – Início do processo de impressão da torre cilíndrica com mesa giratória. 114

Figura 4.8 - Torre cilíndrica impressa com auxílio de mesa giratória, durante e após o processo de impressão.....115

Figura 4.9 – Pormenor que demonstra a queda de uma camada durante o processo de impressão.....115

Figura 4.10 – Fase Inicial da Impressão do vaso.....117

Figura 4.11 – Vista de perfil e de topo da peça, respetivamente.....118

Figura 4.12 – Processo de impressão com areia, como material de suporte. 119

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Opções de sistema de transporte de material nas impressoras BetAbram (BetAbram, 2016b). 34

Tabela 2.2 - Características dos bocais (BetAbram, 2016b)..... 34

Tabela 2.3 - Exemplos de alguns materiais cimentícios, utilizados em impressão 3D..... 65

Tabela 2.4 – Características principais das tecnologias de impressão analisadas..... 68

Tabela 3.1 – Componentes e respetiva função, do sistema de extrusão..... 72

Tabela 3.2 - Limitações do mecanismo de impressão. 77

Tabela 3.3 – Requisitos habitualmente associados ao desempenho para impressão. 79

Tabela 3.4 – Proporções relativas na composição da argamassa..... 81

Tabela 3.5 – Características das fibras metálicas, utilizadas nas argamassas B e C..... 81

Tabela 3.6 – Detalhes de todos os provetes submetidos aos ensaios à flexão. 97

Tabela 3.7 – Detalhes de todos os provetes submetidos aos ensaiados à compressão..... 100

Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios de absorção em 4 horas..... 105

Acrónimos

3DCMP	3D Cementitious Materials Printing
AM	Additive Manufacturing
AMoC	Additive Manufacturing of Concrete
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
FBAUP	Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto
FDM	Fused Deposition Modeling
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IAAC	Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha
ISO	International Organization for Standardization
LSMA	Large Scale Additive Manufacturing
MDF	Medium-Density Fiberboard
UV	Ultra-Violeta
SCC	Self-Compacting Concrete
WASP	World's Advanced Saving Project

Símbolos

mm	Milímetros
mm^2	Milímetros quadrados
mm^3	Milímetros cúbicos
mm/s	Milímetros por segundo
m	Metros
m^2	Metros quadrados
m^3	Metros cúbicos
kN	Quilonewton
MPa	Megapascal
kg	Quilograma
ml	Mililitros
°C	Grau celsius
€	Euro
$	Dólar
≥	Maior ou igual
≤	Menor ou igual

Capítulo 1

1. Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado em Design Industrial e de Produto (MDIP), na Faculdade de Engenharia (FEUP) e na Faculdade de Belas Artes (FBAUP) da Universidade do Porto.

Este capítulo tem como objetivo apresentar o trabalho desenvolvido, intitulado "Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios".

1.1. Considerações Gerais

O betão e as argamassas são dos materiais mais utilizados no planeta. No entanto, o fabrico com estes tipo de materiais, por meios tradicionais, promove o desperdício, assim como, condiciona a geometria da peça, problemas que podem ser resolvidos com o uso da impressão 3D. Trata-se de um processo baseado na deposição sucessiva de camadas de material, em prol dos processos tradicionais, eliminando a necessidade de uso de cofragem e promovendo conceitos de sustentabilidade, assim como de liberdade formal.

A sua presença na indústria é indiscutível com utilizações na área da medicina, indústria aeronáutica, arte, design, entre outras. Porém a sua inclusão na construção tem sido lenta, o que dificulta o desenvolvimento da tecnologia na

impressão com materiais cimentícios. Nos últimos anos, empresas como a BetAbram, CyBe, XtreeE, Apis Cor, Contour Crafting e as universidades de: Eindhoven, Lund e Loughborough têm contribuído para o desenvolvimento da tecnologia por extrusão destes materiais. Este desenvolvimento, apesar de precoce para a inclusão definitiva na construção civil, apresenta utilidade imediata na área do design, respondendo aos requisitos de um público cada vez mais exigente a nível de personalização, preço e prazos de entrega.

As abordagens à tecnologia são feitas de várias formas, algumas empresas utilizam impressoras com sistema de grua-pórtico, enquanto outras utilizam braços robóticos de 6 eixos. Os processos de impressão variam consoante a impressora, peça impressa, material utilizado, ou local de impressão, podendo ser executados tanto "in situ" como em fábricas de pré-fabricação. Na composição do material, podem ser utilizados resíduos de construção ou resíduos de outras indústrias para a redução do consumo de cimento.

Tendo em vista uma impressão de boa qualidade, deverá ser feito um aperfeiçoamento constante entre o sistema de impressão, o material e a peça a imprimir.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem com objetivo principal o estudo e desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, para utilização no fabrico de peças com maior complexidade e personalização, mostrando a sua utilidade para o Design.

Do ponto de vista experimental os objetivos seriam o desenvolvimento de uma argamassa capaz de ser impressa por um sistema de extrusão existente. Assim como o estudo da influência da impressão 3D no comportamento mecânico e na durabilidade de uma peça impressa.

1.3. Metodologia

Inicialmente foi feito um breve levantamento sobre a produção de peças em materiais cimentícios. Após esse levantamento foram descobertos alguns problemas nos seus processos de fabrico que poderiam ser colmatados com a inclusão da tecnologia de impressão 3D. Toda a pesquisa teve por base artigos científicos, livros, patentes, normas, websites e algumas dissertações. Perante a inexistência de literatura portuguesa sobre o tema, a pesquisa foi realizada maioritariamente com base em trabalhos desenvolvidos em países estrangeiros.

Assim que o tema de estudo foi definido procedemos análise da tecnologia existente, onde foram analisadas empresas, universidades e projetos privados que visam desenvolver a tecnologia de impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, tendo em conta: impressora utilizada, material, processo de impressão e peças impressas.

Mais tarde foi otimizado um mecanismo de extrusão para o uso no desenvolvimento do trabalho prático desta dissertação. Essa otimização permitiu o desenvolvimento de 3 argamassas imprimíveis, tendo por base outros materiais propostos na literatura. Foi feita a caracterização das argamassas nas primeiras idades assim como analisada a influência da impressão 3D no comportamento mecânico e durabilidade das peças.

Por último e aplicando todo o conhecimento adquirido foram impressas peças com as argamassas desenvolvidas que comprovam a impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios.

Em síntese a seguinte dissertação está dividida em três fases: numa primeira fase onde se faz o enquadramento teórico do problema e o levantamento das tecnologias existentes; uma segunda parte onde é otimizado o sistema de extrusão e desenvolvido o material; e, por último, uma terceira parte onde são impressas um conjunto de peças que comprovam o conceito apresentado.

1.4. Estrutura

O seguinte documento está subdividido em 6 capítulos.

No Capítulo 1 faz-se a apresentação do tema, assim como, os objetivos principais e a organização da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se um breve enquadramento junto com uma análise ao estado de desenvolvimento da tecnologia. Nessa análise foi feito o levantamento das principais tecnologias de impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios tendo em consideração as impressoras utilizadas, técnicas de impressão, materiais e peças impressas ou projetos futuros.

No Capítulo 3 apresentam-se os 3 tipos de argamassas tendo por base alguns materiais encontrados na literatura. Após o desenvolvimento das argamassas foram realizados ensaios tendo em vista o estudo das propriedades das argamassas nas primeiras idades, bem como a influência da impressão 3D no seu comportamento mecânico e durabilidade.

No Capítulo 4 descrevem-se as impressões das peças assim como a aplicação de técnicas encontradas e desenvolvidas nos capítulos 2 e 3.

Por último nos Capítulos 5 e 6 apresentam-se as conclusões, assim como, as dificuldades obtidas durante o trabalho e algumas soluções para o desenvolvimento do tema no futuro.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

Com os recursos naturais cada vez mais escassos, e um consumo cada vez maior a Humanidade tem procurado soluções sustentáveis para a produção industrial. Uma das soluções pode passar pela substituição dos processos tradicionais de fabrico por subtração de material, por tecnologias de fabrico aditivo que apresentam níveis de desperdício quase nulos. Essas tecnologias de fabrico aditivo são conhecidas por tecnologias de impressão 3D. Para além do caráter sustentável, possibilitam a criação de objetos complexos e personalizáveis pelo consumidor, indo de encontro a um público cada vez mais exigente a nível de personalização, prazos de entrega e preço (Miller et al. 2018; Barros e Zwolinski 2016).

Parte dos problemas acima referidos podem ser solucionados com a tecnologia de impressão 3D, embora o caráter sustentável esteja dependente do perfil do utilizador, pois um uso negligente da tecnologia poderá conduzir à produção de produtos desnecessários e de durabilidade reduzida (Barros e Zwolinski 2016).

2.1. Impressão 3D

A Impressão 3D ou Fabricação Aditiva, do termo inglês Additive Manufacturing (Ai e Du 2014) é uma tecnologia que através de desenhos tridimensionais (ficheiros CAD), recorrendo a softwares de modelação (Figura 2.2), ou com auxílio de tecnologias auxiliares como: tomografia computorizada e sistemas de digitalização, imagens de ressonância magnética, ou simplesmente retirados de bibliotecas online (Bak 2003) executa por meio de um hardware o empilhamento sucessivo de camadas, com um determinado material, para materializar uma peça ou objeto (Ai e Du 2014).

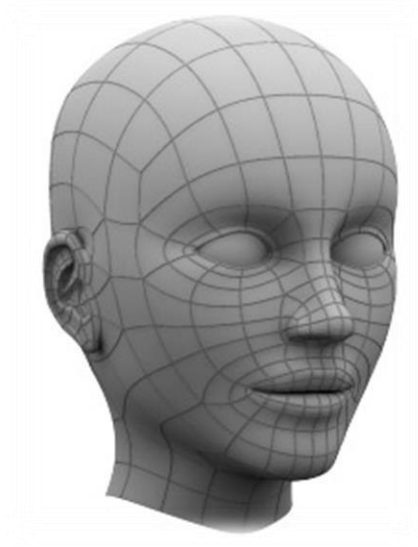


Figura 2.1 – Desenho tridimensional, obtido através de modelação em 3DS MAX (Lehtinen 2007)

Figura 2.2 – Digitalizadores 3D, modelo Sense-RS da 3D Systems e Eva-M da Artec, respetivamente.

O conceito de impressão 3D surge em 1983 com Charles W. Hull, baseado no endurecimento de um material curável por luz UV (Hager, Golonka, e Putanowicz 2016).

Segundo a patente publicada a 11 de março de 1986, a estereolitografia constrói um objeto sólido, através de um empilhamento sucessivo de camadas finas de uma resina fotopolimerizável. Neste processo um feixe de Luz UV, percorre a camada de líquido curável, formando uma secção transversal do objeto na superfície do líquido. De seguida, é rebaixada a secção do objeto já curada, a fim de a revestir com uma nova camada de material, nessa mesma camada é criada a próxima secção do objeto, devidamente ligada à secção anterior, através do mesmo feixe de luz. Esse processo é repetido até o objeto estar formado (Hull 1986). É um método extremamente preciso que privilegia impressões de elevado acabamento e de geometria elaborada (Figura 2.4).

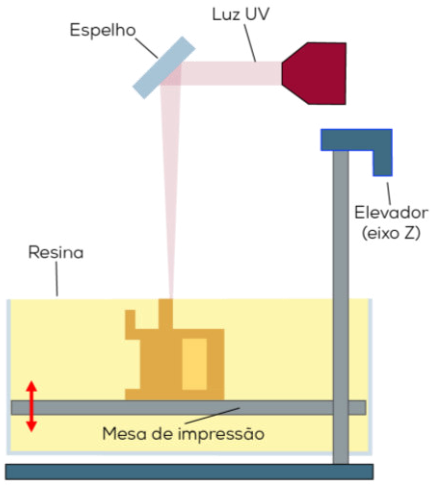


Figura 2.3 - Processo de impressão em estereolitografia (adaptado de Informa USA 2015).

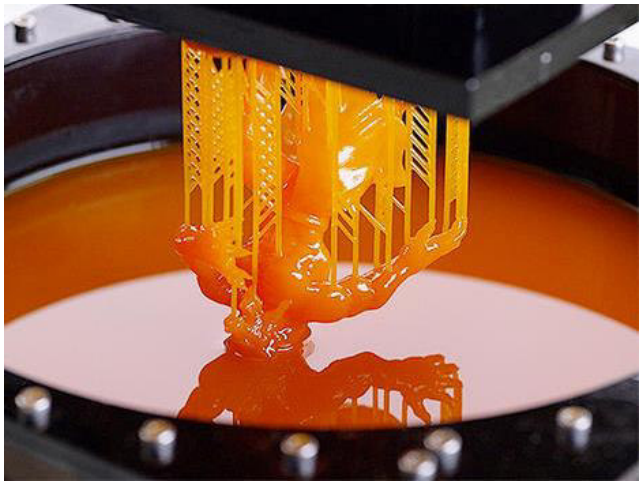


Figura 2.4 - Impressão em estereolitografia (AstroScience 2017).

A inspiração na estereolitografia ou "Vat Photopolymerization" proporcionou a criação de novos processos de impressão tridimensional, todos eles categorizados segundo a norma ISO/ASTM 52900:2015. Esta norma apresenta 7 categorias de processos de fabricação aditiva: o já referido "Vat Photopolymerization", "Binder Jetting", "Directed Energy Deposition", "Material

Extrusion", "Material Jetting", "Powder Bed Fusion" e "Sheet Lamination" (ISO/ASTM 2015).

Apesar da ramificação do conceito de impressão 3D, os vários processos possuem etapas comuns (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Etapas fundamentais durante um processo de fabricação aditiva (adaptado de khorram niaki e Nonino 2015).

Independentemente de todas estas tecnologias de impressão 3D, foram explorados e analisados apenas os processos de impressão: "Vat Photopolymerization", "Material Extrusion" e o "Binder Jetting", sendo os três essenciais para a compreensão deste trabalho. A estereolitografia ou "Vat Photopolymerization" será utilizada no caso de estudo, e as restantes foram conceitos explorados pelas tecnologias de impressão 3D com materiais cimentícios.

"Material Extrusion" - FDM

O método de impressão 3D por FDM (Fused Deposition Modeling), utiliza a extrusão de um filamento de material, para efetuar a sua deposição camada após camada, até à formação de uma peça. Hoje em dia, existe uma grande variedade de materiais, fornecidos em bobines de filamentos de longos metros, sendo os materiais termoplásticos os materiais utilizados. O processo de impressão começa com a instalação de bobines de filamentos na impressora, posteriormente dois rolos, presentes na cabeça de extrusão, empurram o filamento, previamente aquecido até um estado de semi-fundido, para a mesa de impressão, onde é sucessivamente empilhado em camadas, até à formação

da peça. As impressoras de FDM podem conter um segundo bocal na cabeça de extrusão, possibilitando a extrusão de um outro tipo de material, visível na figura 2.6 (University. 2018a; CustomPartNet 2018b).

Na figura 2.7 é apresentado um exemplo de uma peça impressa pelo processo FDM.

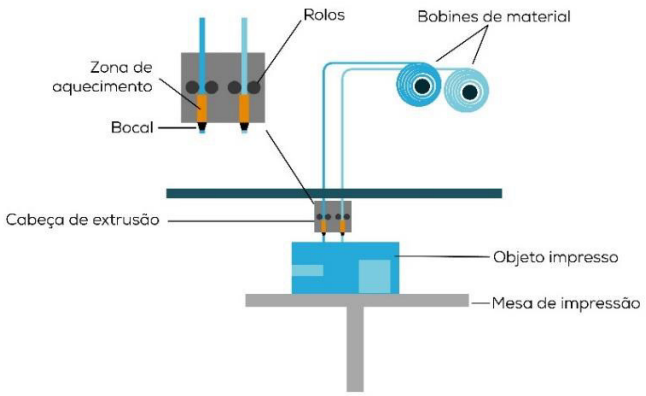


Figura 2.6 - Constituição de uma impressora FDM (adaptado de University. 2018b).

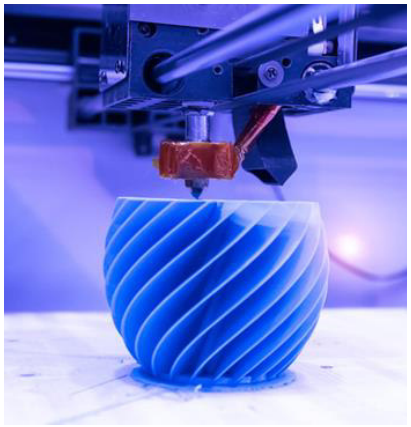


Figura 2.7 – Peça impressa por impressora FDM (3Dnatives 2018).

"Binder Jetting"

O conceito de Impressão "Binder Jetting" desenvolvido em Massachusetts Institute of Technology (MIT), é um processo no qual uma cabeça de impressão deposita um adesivo líquido, sobre uma camada de material, presente em pequenas partículas de pó ou grão. O local onde o adesivo é depositado, une essas mesmas partículas de pó solidificando-as e criando secções transversais da peça a imprimir. Este processo é repetido camada após camada, até à impressão do objeto final (Figura 2.8).

Apesar de permitir liberdade geométrica, trata-se de uma tecnologia que limita a funcionalidade do protótipo devido às fragilidades mecânicas. No entanto, é barata em relação a outros processos de fabricação aditiva, oferece velocidades de construção rápidas, sendo muito utilizada no design e nas artes plásticas, privilegiando a impressão de formas complexas. Os materiais mais

utilizados são os pós metálicos e cerâmicos, figura 2.9 (CustomPartNet 2018a; University. 2018a).

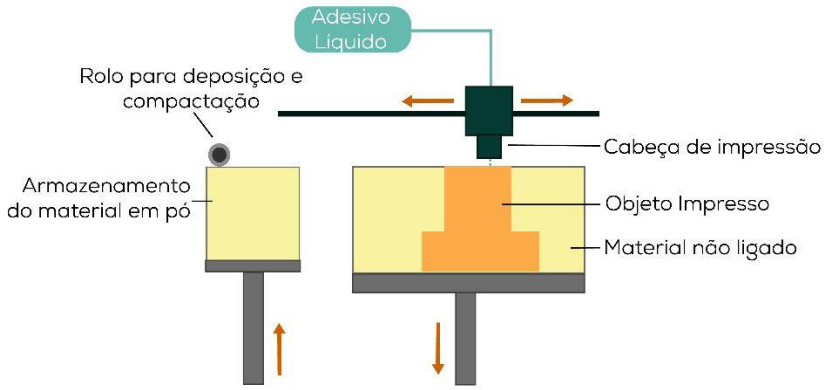


Figura 2.8 – Constituição de uma impressora por "Binder Jetting" (adaptado de University. 2018a).

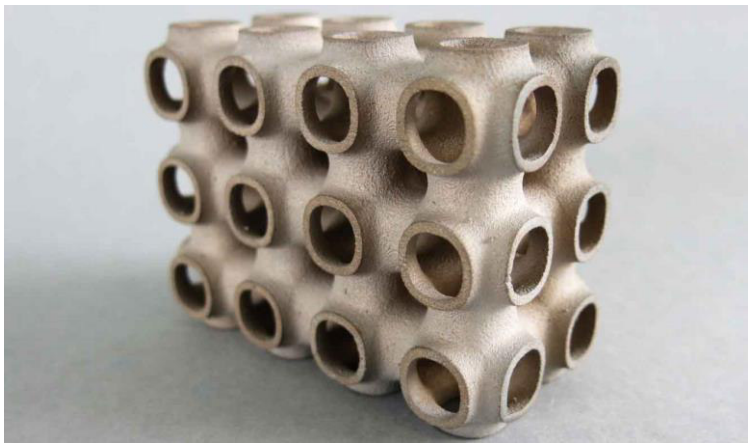


Figura 2.9 – Peça impressa pelo método de impressão "Binder Jetting", com pós metálicos (Sculpteo 2018).

2.2. Impressão 3D com Materiais Cimentícios

Os materiais cimentícios como o betão são os materiais mais utilizados do planeta. A sua elevada utilização justifica-se pelas suas características: nomeadamente resistência à compressão e ao fogo, versatilidade formal antes de curado e principalmente o seu baixo custo, devido à abundância dos seus materiais constituintes. Um conjunto de características, que embora de grande importância para a construção, promovem muitas vezes uma utilização inconsciente e descuidada, com elevados desperdícios de material (Bos et al. 2016). Para além desses desperdícios, estão associadas elevadas emissões de

CO_2 para a atmosfera durante o processo de fabrico do cimento, onde é necessária a queima do calcário para a obtenção do clínquer (clinquerização), que depois de uma fina moagem dá origem ao cimento (Cimpor 2017b). O desperdício de materiais é ainda agravado pela necessidade de cofragem durante a betonagem, que aumenta os gastos e o tempo de construção (Bos et al. 2016).

Nos processos tradicionais de fabrico, a produção de formas muito elaboradas (Figura 2.10) resulta em gastos elevados, por exemplo a figura 2.11, mesmo apresentando uma forma geométrica simples a complexidade da cofragem é elevada o que dificulta e encarece o projeto. Este problema torna muitos projetos de construção, com formas mais arrojadas, inexequíveis devido: ao aumento dos gastos em material e em tempo de fabrico; à necessidade de uma mão-de-obra qualificada, principalmente no caso de betonagens "in situ"; à necessidade de armadura na sua estrutura, para melhorar a resistência à tração, um dos pontos fracos dos materiais cimentícios; ao transporte de elementos estruturais mais complicados, que muitas vezes são pré-fabricados.

Todos estes fatores influenciam a engenharia, a arquitetura e o design no momento de projetar, optando na maioria das vezes por formas geométricas simples (Figura 2.12), para diminuir os gastos e o impacto da sua produção (Bos et al. 2016).

Figura 2.10 – Casa da Música Porto, Portugal.

Figura 2.11 - Cofragem do edifício MAXXI - Museo nazionale delle arti del XXI secolo, Italy (Coffrages, 2003-2009).

Figura 2.12 - Conjunto de bancos fabricados com recurso a cofragem (ranchoavellanas.com 2018b); banco fabricado com recurso a cofragem (ranchoavellanas.com 2018a), respetivamente.

Em projeto, cerca de 60% do orçamento total é destinado a cofragens, esta percentagem nos gastos é provocada maioritariamente pela mão-de-obra (Figura 2.13), necessária para a montagem e construção das cofragens. Quanto maior complexidade na forma, maior a necessidade de mão-de-obra qualificada, o que por sua vez aumenta o preço da peça. Esta mão-de-obra, envelhecida nos países desenvolvidos, é muitas vezes sujeita a esforços físicos elevados, com segurança comprometida, visto que muitos acidentes na construção se devem à cedência de cofragens ou andaimes. Todas estas condicionantes atrasam ainda o tempo de fabrico, um fator importantíssimo, sendo que, muitas construções estão sujeitas a prazos apertados (Nemati 2007; Perrot, Rangeard, e Pierre 2016).

Figura 2.13 - Gráfico com a repartição de custos de uma construção em betão (adaptado de Nemati 2007).

Apesar dos riscos, alguns arquitetos usaram formas extremamente complexas, o caso de Antoni Gaudi, Erich Mendelsohn e Rudolf Scheineder, e todos eles, de alguma forma, depararam-se com dificuldades na conclusão das suas obras.

O exemplo de Gaudi, com a obra "A Sagrada Família" (Figura 2.14), um projeto denominado de "protoparamético" devido à sua extrema complexidade, resultou num longo período de construção que permanece até aos dias de hoje. Em 2001 foram introduzidas tecnologias de impressão 3D para agilizar a construção, que tem como data de finalização o ano de 2026, centenário da morte de Gaudi (Scott 2016).

Erich Mendelson, na Torre Einstein (Figura 2.15), um projeto que espelhava a excentricidade dos conceitos científicos ao qual a obra estava associada, com formas fluídas, curvilíneas, côncavas e convexas, um dos poucos exemplares da arquitetura expressionista. Inicialmente o projeto foi pensado para ser totalmente construído em betão armado, no entanto, devido à sua complexidade teve de ser substituído por tijolos cobertos por estuque, uma alteração que teve consequências na sua durabilidade, sendo submetido a sucessivas remodelações (Twentieth Century Society 2018).

Rudolf Scheineder na construção do "First Goetheanum" (Figura 2.16) é utilizada madeira no reforço do betão, que mais tarde resultou no seu desaparecimento devido a um incêndio a 31 de dezembro de 1922 (turkaramamotoru 2014).

Em suma, todos estes exemplos permitem concluir que sempre que as construções em materiais cimentícios apresentavam formas com alguma complexidade, originavam problemas estruturais ou de durabilidade do edifício.

Figura 2.14 – Basílica da Sagrada Família (Daudé 201?).

Figura 2.15 – Torre Einstein (Arlt. 2018).

Figura 2.16 – First Goetheanum (www.goetheanum.org 2005).

Todos os problemas apresentados motivaram o aparecimento de tecnologias de Impressão 3D com materiais cimentícios, por vezes denominados de LSMA (Large Scale Additive Manufacturing), AMoC (Additive Manufacturing of Concrete) ou ainda 3DCMP (3D Cementitious Materials Printing), um processo de fabricação aditiva que pretende automatizar e otimizar a indústria de construção com materiais cimentícios (Weng et al. 2018).

Na última década têm sido feitas várias investigações na Impressão 3D para a impressão com materiais cimentícios, especialmente no desenvolvimento de sistemas de impressão com extrusão de argamassas (Bos et al. 2016),

Este tipo de tecnologia apesar de ainda não conseguir competir com a qualidade de construção de um processo tradicional, tem um potencial enorme e imediato para a sua utilização no Design, pois motiva a impressão de peças de médio e pequeno porte e com grande complexidade, sem necessidade de respeitar normas ou regulamentos (fatores que dificultam a sua integração na

construção, assim como tamanho, entre outras) como: mobiliário urbano, pequenas estruturas ornamentais, vasos, entre outros.

2.3. Tecnologias de Impressão 3D com Materiais Cimentícios

Neste subcapítulo são abordadas as principais tecnologias de impressão em grande escala, com principal destaque para as que se dedicam à extrusão de materiais cimentícios ou similares. Estas tecnologias serão analisadas segundo: o seu processo de impressão, o material utilizado e peças impressas ou projetos nos quais estão envolvidos. No final de cada tecnologia será apresentada uma pequena conclusão com base nos benefícios que teria a sua implementação no Design Industrial e de Produto.

As duas primeiras tecnologias têm como conceito o "Binder Jetting", com base na impressão do material em grão, enquanto as restantes utilizam o conceito "Material Extrusion", que explora a extrusão de material (Figura 2.17).

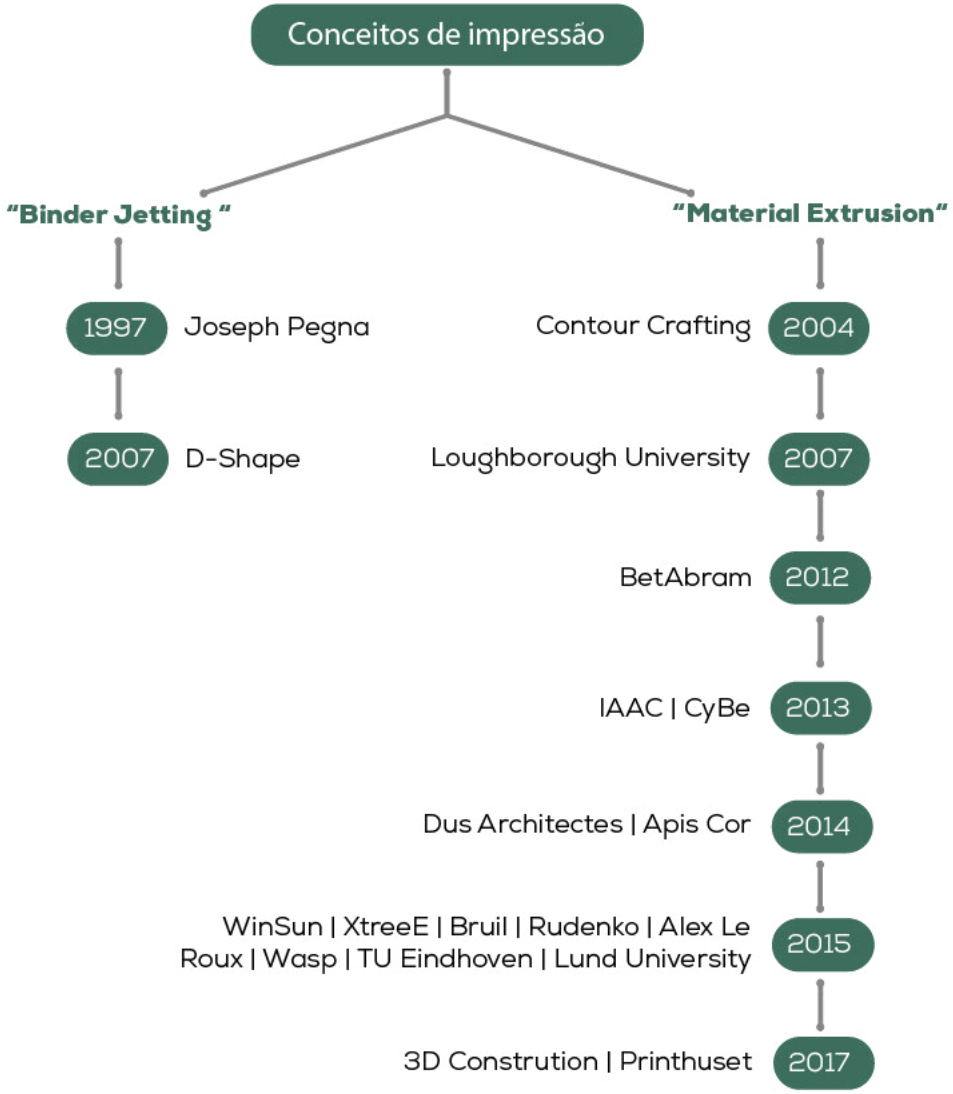


Figura 2.17 –Conceitos de impressão 3D abordados durante a revisão da literatura.

2.3.1. Processos de Impressão com Material em Grão

Os processos de impressão 3D apresentados por Joseph Pegna e Enrico Dini têm como conceito base, a tecnologia "Binder Jetting", utilizando a deposição de finas camadas de material em grão (areia ou fragmentos de rocha triturada) consolidados por um ligante.

2.3.1.1. Joseph Pegna

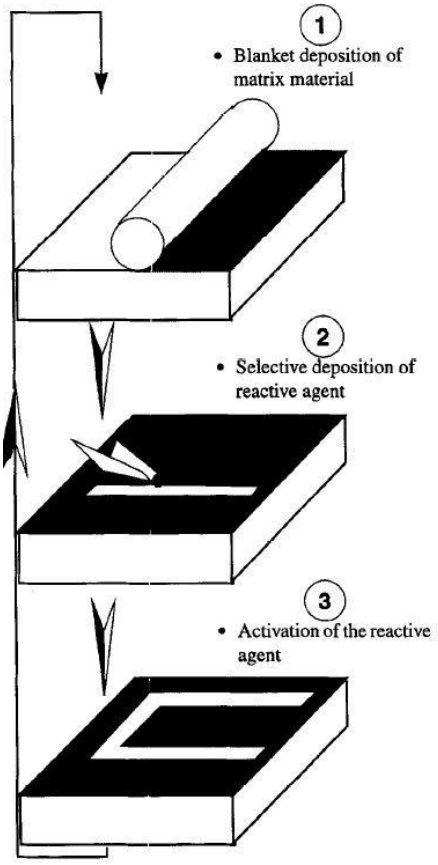


Figura 2.18 - Diagrama do processo de impressão proposto por J. Pegna (Pegna, 1997).

O primeiro conceito de fabricação aditiva em grande escala, surge em 1997, com Joseph Pegna. Este método utiliza 3 materiais (cimento, areia e água). O seu funcionamento consiste na deposição de uma camada de areia com 1mm de espessura, onde posteriormente é depositado cimento nas partes que devem constituir a peça. Após deposição do cimento, toda a camada é vaporizada com água, iniciando o processo de hidratação do cimento, que endurece e consolida os grãos de areia, funcionando como ligante. Este processo é repetido camada a camada (Figura 2.18).

Por último, é retirada a areia, sem influência da hidratação do cimento, restando apenas a peça impressa em estado sólido (Pegna 1997).

2.3.1.2. D-Shape

É um processo de impressão 3D, criado em 2007 pelo engenheiro civil Enrico Dini. A impressora do processo, D-Shape (Figura 2.19), consolida calcário dolomítico esmagado, em pedra sólida. Esta consolidação é feita graças a um aglutinante natural, patenteado, testado com sucesso em agregados de mármore e rocha vulcanizada, numa mesa de impressão com as dimensões de 4x4 m (Dini 2018). Cada camada de material é colocada com a espessura desejada, compactada e por fim pulverizada com o ligante, na zona que preenche a secção transversal da peça a imprimir. À semelhança do processo anterior, no

fim da impressão, é retirado o material não consolidado pelo ligante e a peça que se encontra no estado sólido (Lim et al. 2012). Este processo foi utilizado em inúmeros projetos, entre eles uma peça arquitetónica de 1,6 m, nomeada de "Radiolaria" (Figura 2.20 e 2.21), e uma ponte pedonal em Alcobendas, Madrid, com 12 m de comprimento e 1,75 m de largura (Figura 2.22), em parceria com o Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha-IAAC (Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya 2018b).

Figura 2.19 – Impressora em processo de impressão, D-Shape (BuiltWorlds Voices 2016).

Figura 2.20 - Processo de extração do material em excesso na peça "Radiolaria" (Peerless Media 2012).

Figura 2.21 - Peça impressa pelo processo D-Shape, intitulada "Radiolaria" (BEYOND 2015).

Figura 2.22 - Ponte pedonal em Alcobendas, Madrid, com 12 m de comprimento e 1,75 m de largura (BEYOND 2015).

Os processos de impressão com o material em grão apresentam características interessantes para a sua utilização no Design Industrial e de Produto. Tal como a tecnologia "Binder Jetting", permite a impressão de objetos de grande complexidade, sem as fragilidades apresentadas pelos materiais cerâmicos utilizados nas impressoras de pequena escala. Sendo, que as peças impressas por Enrico Dini, depois de curadas, apresentam estrutura semelhante a rochas, o que promove a utilização da tecnologia em peças funcionais, como mobiliário urbano, peças decorativas de grande escala, como a "Radiolaria" ou construção de pequenas pontes pedonais. Permite a utilização de material apenas onde este é necessário, promovendo vazios e aberturas em qualquer parte da peça. Todo o material não utilizado na peça, para além de lhe proporcionar suporte antes de curada pode ser reaproveitado numa nova impressão, não havendo desperdícios.

2.3.2. Processos de Impressão por Extrusão de Material

O conceito seguinte tem por base a extrusão de filamentos de material e a sua deposição em camadas. A aplicação desta técnica em materiais cimentícios surge em 2004 com a Contour Crafting, e tem vindo a crescer drasticamente desde 2015, com projetos em: startups, empresas, particulares e universidades. A pesquisa de todas as tecnologias apresentadas foi feita segundo: impressora e técnica de impressão, material utilizado e peças impressas. No final da

apresentação de cada tecnologia será realizada uma breve conclusão com as principais características, problemas e soluções apresentadas no processo de impressão, assim como, vantagens que teriam para a utilização no Design Industrial e do Produto.

2.3.2.1. DUS ARCHITECTS

Em 2014 é impresso um edifício ao longo do canal de Amesterdão, um passo importantíssimo na impressão em grande escala (Ai e Du 2014). Um projeto da DUS ARCHITECTS, sendo que parte do financiamento foi adquirida pela venda de bilhetes para o início da impressão. Para materializar o projeto foi desenvolvida e utilizada a impressora Kamermaker (em inglês roommaker). Uma impressora, instalada no interior de um contentor de 6 m de altura, em tudo semelhante a uma impressora FDM, onde é feita a extrusão de um filamento de material em camadas. Podemos ver a sua utilização em impressões de estruturas menores como bancos (Figura 2.23), ou na já referida casa do canal, onde cada um dos elementos será construído individualmente, e de seguida encaixado num todo. No final, o projeto manterá as formas tradicionais das típicas casas do canal, e funcionará com 12 salas dedicadas a diferentes tipos de impressão 3D, figura 2.24 (Rutkin 2014).

Figura 2.23 – Impressora 3D Kamermaker (Punchbowl Media 2016), banco Impresso pela impressora Kamermaker (decoist.com 2008).

Figura 2.24 – Projeto 3D Print Canal House (Simply Amsterdam 2018).

Embora não tenha sido utilizado um material cimentício neste projeto, ele é aqui referenciado como sendo um marco histórico na fabricação aditiva em grande escala.

2.3.2.2. Contour Crafting

Contour Crafting (CC) é uma empresa americana, criada pelo Dr. Behrokh Khoshnevis em 2004, que pretende desenvolver a tecnologia de impressão 3D

para a otimização da construção com materiais cimentícios. O objetivo principal passa pela construção de habitações de baixo custo em qualquer parte do mundo (Contour Crafting Corporation 2017).

Sem grande detalhe, devido à falta de imagens da impressora, podemos referir que utiliza uma estrutura tipo grua-pórtico, de grande escala, semelhante a uma impressora FDM, que garante os movimentos nos eixos x, y e z. Os restantes movimentos do extrusor são garantidos por um braço robótico acoplado à estrutura, o extrusor, contém vários bocais, que podem garantir a extrusão de vários tipos de materiais em simultâneo ou apenas um. Os extrusores com mais que um bocal, são utilizados para a impressão de paredes, onde os exteriores garantem o contorno externo, enquanto o interior proporciona o seu preenchimento (Figura 2.25). Os bocais exteriores podem ainda possuir espátulas que garantem um bom acabamento do contorno, assim como, a criação de superfícies não ortogonais à base. Nesta tecnologia o extrusor e o bocal são projetados segundo a peça a imprimir (Figura 2.26). A espátula é vista como uma ferramenta de acabamento, remetendo para o conceito artesanal, termo utilizado no próprio nome da tecnologia Contour Crafting (contorno artesanal), sendo cada extrusor uma ferramenta do artesão-impressora (Khoshnevis 2004a).

Na construção de habitações a impressora poderá ser equipada com ferramentas capazes de instalar sistemas elétricos, canalização, e proporcionar acabamentos ornamentais como pinturas (Khoshnevis 2004a).

Figura 2.25 – Extrusor com triplo bocal em processo de impressão de uma parede, com reforço interior (Hewitt, 2010).

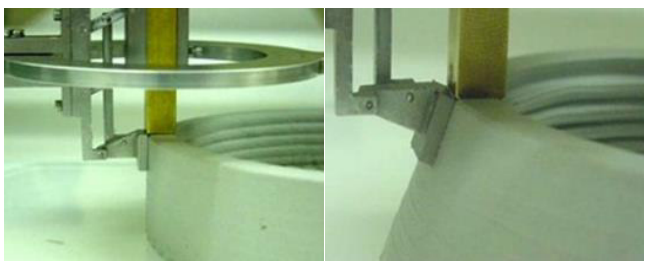


Figura 2.26 - Impressão de parede ortogonal e obliqua, respetivamente, mostrando a versatilidade dada pela espátula no momento de impressão (Fabbaloo 2014).

Os resultados desta tecnologia permitiram sonhar com a construção fora do planeta Terra, uma teoria validada pela NASA no Tech Briefs Media Group, onde foi selecionada no meio de mais de 1000 concorrentes, como tecnologia de enorme inovação (Contour Crafting Corporation 2017). O valor da Contour Crafting parte da sua capacidade de construção imediata, sem auxílio de mão-de-obra, que pode garantir a construção de uma base robusta, em materiais cimentícios, nas superfícies da Lua ou de Marte (Figura 2.27) e do seu novo material o Sulfur Concrete Contour Crafting (SCCC), uma nova versão de betão, à base de enxofre, que não necessita de água para hidratar, atingir alta resistência ou alcançar longa durabilidade (Khoshnevis et al. 2016).

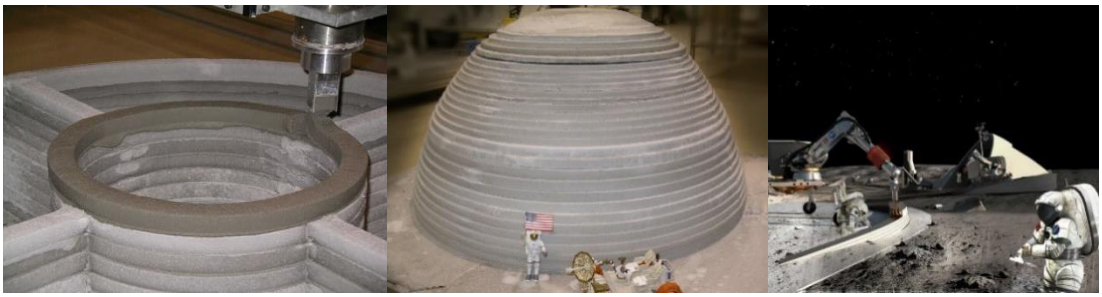


Figura 2.27 - Impressão de uma parede circular, através da tecnologia de impressão CC (AUTODESK 2015), protótipo de base Marciana/Lunar, impressa pela tecnologia CC (Contour Crafting Corporation 2017), render de possível uso da tecnologia CC na construção espacial (AUTODESK, 2015), respetivamente.

A Contour Crafting foi das primeiras empresas a utilizar uma tecnologia de impressão 3D por extrusão de um material cimentício, sendo pioneira na área. No entanto, apesar do passar dos anos, não divulgou dados específicos sobre o seu processo de impressão ou sobre o seu material, o que deixa muito a cargo da nossa imaginação.

A utilização da espátula com um conceito artesanal, que garante vários tipos de acabamentos, são a principal característica da tecnologia, que permite enumeras utilizações para o uso no design.

Características

Contour Crafting | País: EUA | Categoria: Empresa | Ano: 2004 | Acabamento: Espátula | Geometria do bocal: Variável | Espessura da camada: Variável | Estrutura: Grua-pórtico e braço robótico | Ambiente de utilização: "in situ" | Material: Argamassa (Khoshnevis 2004a; Khoshnevis et al. 2016; Khoshnevis 2004b; Contour Crafting Corporation 2017; Khoshnevis et al. 2006).

2.3.2.3. Loughborough University

A equipa de pesquisa da Universidade de Loughborough desenvolveu a tecnologia de Impressão 3D em materiais cimentícios 3D Concrete Printing, com o objetivo de fabricar componentes em betão sem a utilização de cofragem (Loughborough University 2018; Lim et al. 2011).

A estrutura da impressora é semelhante à utilizada pela C.C, onde uma grua-pórtico e um braço robótico controlam o extrusor (Figura 2.28). Possui um bocal de 9 mm de diâmetro, capaz de depositar gesso e argamassa, e garantir a sua deposição em camadas. O uso desta abertura no bocal resulta em camadas de aproximadamente 6 mm de espessura. O sistema é abastecido com pequenas quantidades de material, sendo a distância percorrida e o tempo gasto entre o local de amassadura e a deposição do material curto, o que garante que o material tenha a qualidade ótima para impressão (Lim et al. 2011). A velocidade máxima de impressão pode chegar aos 600 mm/s. Para diminuir o peso do objeto final foram introduzidos nas impressões espaços vazios (Figura 2.29 e 2.30), que podem ainda funcionar como isolamento, ou mesmo servindo de reforço com a colocação de armadura no seu interior (Figura 2.31) o que melhora a sua resistência (Lim et al. 2011).

Para este sistema de impressão foi desenvolvida uma mistura à base de cimento e gesso, embora não sejam divulgadas mais informações sabe-se que apresenta uma resistência à compressão na ordem dos 80~88 MPa (Lim et al. 2011).

Esta tecnologia foi testada na impressão de elementos arquitetónicos de fachadas, cuja produção por via convencional teria custos demasiado elevados, isto, no caso de estruturas com curvas e contracurvas como na figura 2.29 e 2.30 (Loughborough University 2018).

Figura 2.28 - Impressora utilizada pela Universidade de Loughborough (Lim et al. 2011).

Figura 2.29 – Elemento impresso pela Universidade de Loughborough (concreteprinting 2010).

Figura 2.30 - Elemento arquitetónico impresso pela Universidade de Loughborough (Loughborough University 2018; Lim et al. 2011).

Figura 2.31 - Pormenor dos vazios do elemento impresso na figura 2.29 (Lim et al. 2011).

Com a análise desta tecnologia percebe-se que: o tempo gasto entre amassadura e deposição deve ser estudado para que o material seja extrudido no momento em que atinge as propriedades ótimas para impressão; a utilização de vazios pode ser estudada para diminuição do peso da peça, isolamento ou colocação de armadura; a projeção de painéis arquitetónicos de caráter ornamental aumentará a ligação entre arquitetura e design, o que é de total interesse para o desenvolvimento do meio urbano.

Características

Loughborough University | País: Inglaterra | Categoria: Universidade | Ano: 2007 | Impressora: 3D Concrete Printing | Geometria do bocal: Redondo | Diâmetro do bocal: 9 mm | Espessura da camada: 6 mm | Estrutura: Pórtico e braço robótico | Dimensões: 5,4x4,4x5,4 m | Velocidade de Impressão: 600 mm/s | Ambiente de utilização: Pavilhão| Material: Argamassa e gesso | Resistência à compressão da mistura: 80~88MPa (Loughborough University 2018; Lim et al. 2011; concreteprinting 2010).

2.3.2.4. Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC)

IAAC é um centro de pesquisa, educação, produção e divulgação, com a missão de visualizar o futuro da construção da nossa sociedade e aplicá-la no presente. Para tal este centro de pesquisa, possui uma equipa a desenvolver técnicas de fabricação aditiva em grande escala, das quais se destacam os Minibuilders (Catalunya; Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya 2018a).

A robótica oferece um grande potencial para a inovação no setor da construção, no entanto, os sistemas existentes possuem características que dificultam a sua inclusão no setor. Exemplo da proporção entre o objeto e a impressora, onde o tamanho do objeto é restringido pela área de impressão, ou seja, objetos de grandes dimensões exigem impressoras de grandes dimensões. Logo, em contexto de construção, seria demasiado dispendioso, criar uma impressora capaz de imprimir uma habitação por completo, pois, a construção da impressora teria uma percentagem elevada no tempo e no custo total da obra. É com base nesta problemática que surge o conceito da tecnologia Minibuilders, uma família de robôs, de pequena escala, capaz de se mover de forma independente, apto para a impressão de objetos maiores que o seu porte (Catalunya).

A base deste projeto assenta em 3 famílias de robôs: a primeira tipologia nomeada de "Base Robot" é responsável pela impressão das dez primeiras camadas (Figura 2.35); a segunda "Grip Robot" é acoplado nessas 10 camadas, através de um sistema de fixação próprio, que dá continuidade ao contorno já feito até ao final da peça (Figura 2.32); por último a terceira tipologia de robô "Vacuum Robot", que com ajuda de um sistema de fixação, possibilita a impressão sobre as superfícies já impressas da peça, segundo qualquer orientação, ou seja poderá criar relevos decorativos ou estruturais nas paredes laterias (Figura 2.33). O facto de cada robô completar o anterior, a capacidade de construir objetos maiores que o seu tamanho, oferece na hora de projetar maior liberdade no tamanho e na geometria. As suas pequenas proporções permitem ainda o seu transporte para o local da impressão, estando apenas

condicionados por uma quarta máquina, presente na figura 2.34, de maior escala, necessária para o abastecimento dos robôs (Stereotactil 2015).

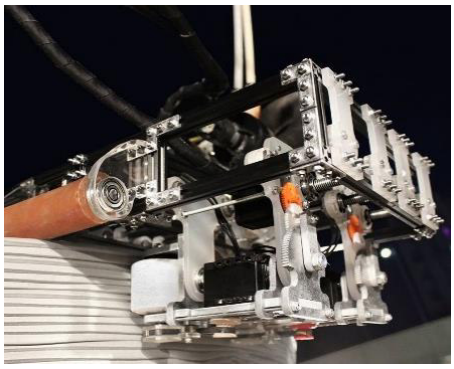


Figura 2.32 - Robô "Grip Robot" durante processo de impressão. Dimensões de 400x400x300 mm (IAAC 201?).

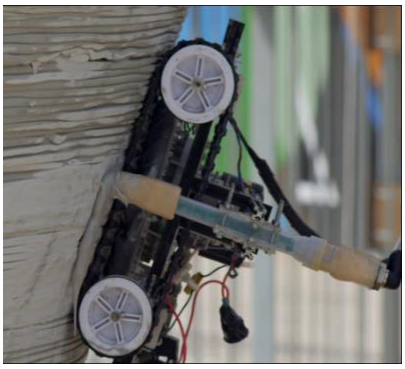


Figura 2.33 - Robô "Vacuum Robot" em processo de impressão. Dimensões de 270x300x120 mm (Stereotactil 2015).

Figura 2.34 – Processo de impressão, com destaque para o mecanismo de armazenamento e transporte de material (IAAC 201?).

Figura 2.35 - Robô "Base Robot" durante processo de impressão, com as dimensões de 270x300x120 mm (Stereotactil, 2015).

A liberdade garantida pelo movimento dos robôs é apenas condicionada pelo sistema de armazenamento, ou seja, quanto maior for a peça maior será o caminho percorrido pelo material, aumentando o risco de entupimento. Para aplicações em Design, o terceiro robô "Vacuum Robot", com capacidade de "desenhar" na superfície do objeto seria uma ferramenta de grande interesse.

Características

País: Espanha | Categoria: Universidade | Ano: 2013 | Impressora: Minibuilders | Geometria do bocal: Redondo | Estrutura: Mini robôs | Dimensões: 270x300x120 mm | 400x420x300 mm | Movimento: Livre | Ambiente de utilização: "in situ" | Material: Argamassa (Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya 2018b, 2018c).

2.3.2.5. WinSun Company

Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd, mais conhecida por WinSun Company, inicialmente fornecedores de materiais de construção foram durante muito tempo especialista em decorações complexas de interiores (Goldin 2014). Após a maturidade alcançada na indústria de materiais de construção, criam em 2007 um novo material, o crazy magic stone, que permite a entrada no mundo da impressão 3D (Yingchuang Building Technique 2017).

Em 2015 surge a sua impressora 3D de extrusão de betão, de estilo grua-pórtico, com as dimensões de 10x6,6x150 m (Figura 2.36 e 2.37), tornando-se a maior impressora 3D do mundo (Goldin 2014).

Figura 2.36 – Pormenor da impressora WinSun (Caxin 2015).

Figura 2.37 - Processo de impressão da WinSun Company (Caxin 2015).

A argamassa utilizada é uma argamassa especial, à base de areia, cimento, fibras, aditivos, e resíduos de demolição, ou desperdícios de minas, e a sua impressão possuí uma taxa de desperdício próxima dos 0% (Waterloo 2016; Goldin 2014; New China TV 2014). Utiliza camadas cuja espessura pode oscilar entre os 6 e os 30 mm. Durante o processo de impressão os componentes estruturais de grande porte são impressos em pavilhões onde a impressora está instalada e posteriormente são transportados para o local da construção, onde são colocados sobre fundações construídas por processos tradicionais, cumprindo com os regulamentos regionais para a construção. Essas estruturas muitas vezes ocas (Figura 2.38, 2.39) podem adquirir a função de cofragem, onde é feito o seu enchimento com betão no local de construção, funcionando

como módulos pré-fabricados (exemplo da habitação da figura 2.40) podendo mais facilmente preencher os requisitos de segurança das rígidas normas de construção (Goldin 2014).

A utilização desta tecnologia permite a redução do tempo de construção, nos custos de fabricação e nos desperdícios de material de forma bastante significativa, o que promove uma construção sustentável e económica. Sendo que os custos podem ser reduzidos até 80%, e os gastos com materiais reduzidos entre os 30 e 60%.

Figura 2.38 - Parte de uma parede impressa pela WinSun (Caxin, 2015).

Figura 2.39 - Elemento decorativo impresso pela WinSun (Doris, 2018).

Figura 2.40 - Interior de uma habitação impressa em betão (Matjaz Tanc Ic).

A WinSun tem vindo a desenvolver impressoras para o uso em infraestruturas como pontes, colunas e mais recentemente para o uso na construção em altura, o que define a sua aposta na construção civil (Goldin, 2014). A nível de impressões conta com um elevado número de projetos materializados, a maior parte construções de grande escala (Figuras 2.41, 2.42).

Figura 2.41 - Pequena construção totalmente impressa em materiais cimentícios (Doris 2018).

Figura 2.42 - Habitação impressa pela WinSun (New China TV 2014).

Apesar do material para impressão necessitar de um conjunto de propriedades de alto desempenho, não significa que a utilização de resíduos não seja introduzida na sua composição. A WinSun com um vasto espólio de impressões 3D em materiais cimentícios, desde habitações a pequenos objetos, provou que um material de impressão também pode ser ecológico, diminuindo o consumo de cimento, que por sua vez diminui as emissões de CO_2. A nível técnico, mais uma vez, é visível a utilização de vazios, nos elementos impressos, que diminuem o peso da peça a nível físico e visual, podendo também funcionar como cofragem. Apesar da grande variedade de projetos na construção civil, a WinSun apresenta pequenas peças de grande acabamento superficial, visíveis na figura 2.39. O bom acabamento proporcionado pelo material motiva a sua inclusão no design, por outro lado o tamanho da impressora define que o principal objetivo da WinSun é a construção civil.

Caracteristicas

WinSun | País: China | Categoria: Empresa | Ano: 2015 | Geometria do bocal: Retangular | Espessura da camada: 6 a 30 mm | Estrutura: grua-pórtico| Dimensões: 10x150x6,6 m | Ambiente de utilização: Pavilhão | Material: Argamassa (Matjaz Tanc Ic; Caxin 2015; New China TV 2014; Doris 2018).

2.3.2.6. HuaShang Tengda 3D Printing System

Pequim HuaShang Lu Hai Technology Co., fundada em 1989, está situada no distrito de Tongzhou na zona de desenvolvimento industrial de Pequim, sendo uma das principais concorrentes da WinSun (Scott 2016).

HuaShang Tengda é mais um exemplo de tecnologia que utiliza a impressão 3D por extrusão de betão, no entanto, uma das curiosidades neste sistema, é o uso de um betão comum da classe C30, afirmando ainda, que o seu equipamento é capaz de imprimir com qualquer outro tipo de material cimentício. Para além da utilização de um betão comum, normalizado, o processo de impressão assemelha-se aos processos tradicionais de construção. Uma dessas semelhanças é a inclusão de armadura no seu interior, mas, como nos outros métodos de impressão, não utiliza cofragem (Scott 2016). A existência de armadura durante a impressão, obriga à criação de um novo extrusor, este possuí uma cabeça bifurcada, com espátulas (Figura 2.43), capaz de imprimir dos dois lados da armadura (New China TV 2016).

Tal como a maioria das tecnologias que utiliza a impressão com extrusão de betão ou argamassas, apresenta 3 operações essenciais durante o seu processo de impressão: a mistura do material, o transporte, e a sua deposição (Scott 2016).

Figura 2.43 – Impressora e pormenor do extrusor desenvolvido pela HuaShang Tegda (New China TV 2016).

O exemplo mais emblemático de aplicação desta tecnologia é uma casa de 2 andares, com uma área de 400 m^2, capaz de suportar um terramoto de 8.0 na escala de Richter, visível nas figuras 2.44 e 2.45 (Joel 2016).

Figura 2.44 - Habitação impressa em betão, no local de construção, durante 45 dias pela HuaShang Tengda (Scott 2016),

Figura 2.45 - Habitação anterior devidamente acabada (Tengda, 2016).

Esta empresa procura utilizar métodos de construção tradicionais no seu processo de impressão, para construir habitações de elevada segurança e resistência, podendo resistir a terramotos de elevada magnitude. No entanto, é um processo que carece de um bom acabamento superficial, pelo facto de utilizar um material com agregados de maior diâmetro, e um extrusor bifurcado com bocais de grande abertura. A tecnologia apresenta ótimos resultados na impressão de habitações, no entanto, para o design apresenta características

desfavoráveis pois não privilegia a impressão de peças de pequeno e médio porte.

Características

HuaShang Tengda | País: China | Categoria: Empresa | Ano: 2015 | Geometria do bocal: Retangular | Estrutura: Grua-pórtico | Ambiente de utilização: "in situ" | Material: Betão (Joel 2016; Tengda 2016; New China TV 2016).

2.3.2.7. BetAbram

Sediada na Eslovénia, a BetAbram é, desde 2012, uma importante referência no desenvolvimento e venda de tecnologia de Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios. O principal objetivo da empresa é a impressão de habitações de baixo custo, em particular, nos países em desenvolvimento ou zonas afetadas por catástrofes naturais (BetAbram 2016a).

As impressoras da BetAbram (Figura 2.46) estão dívidas em 3 modelos: a P3, uma versão mais barata, pensada para entusiastas de Impressão 3D, com as dimensões de 2,5x3x6 m *(BetAbram 2016b),* e à venda no mercado por valores entre os 10 000€ e os 16 000€ (Industry 2014); a P2, uma versão intermédia, de maior porte, com 2,5x6x12 m (BetAbram 2016b), pode ser adquirida por um valor a rondar os 20 000€ (Industry 2014); por último, de maior relevância a P1, uma impressora pensada para o meio industrial, sendo uma opção viável para empresas de construção civil, que queiram dar início à Impressão de habitações de baixo custo, apresenta as dimensões de 2,5x9x18 m (BetAbram 2016b) e um valor de mercado entre os 32 000 e os 44 000 € (Industry 2014).

A BetAbram para além das 3 tipologias de impressoras, possibilita a otimização das mesmas a nível: do sistema de transporte de material (Tabela 2.1); e do bocal, um redondo (Figura 2.47) e outro retangular, com espátulas (Figura 2.48) que melhoram o acabamento da impressão (Tabela 2.2) *(BetAbram 2016b).*

Figura 2.46 – Modelo de impressora, BetAbram (BetAbram, 2016b).

Figura 2.47 – Bocal redondo em processo de impressão (betabram_videos 2015).

Figura 2.48 - Impressão com o uso do bocal quadrado, onde é visível o uso das espátulas no acabamento lateral (Ribic 2018).

Tabela 2.1 - Opções de sistema de transporte de material nas impressoras BetAbram (BetAbram, 2016b).

	Elevador	Bomba
Pessoas	1	2
Custos	Mais barato	Mais rápido
Material	Até 16 mm	Até 0,3 mm
Velocidade	300 mm/s	500 mm/s

Tabela 2.2 - Características dos bocais (BetAbram, 2016b).

Redondo	Quadrado
Consegue imprimir todo o tipo de curvas	Camadas mais suaves
Maior liberdade geométrica	Adequado para formas ortogonais
Maior rapidez	Melhor acabamento

A BetAbram é uma empresa que vende vários tipos de impressoras, a personalização deu a conhecer que é possível criar melhores acabamentos com um bico quadrado ou retangular, e um redondo que privilegia a velocidade e a liberdade formal. Outro ponto a salientar é a impressão sobre superfícies rugosas como areia, brita ou malha de vidro, que permite que a primeira camada não sofra deformações tão acentuadas. Por último a impressão da peça da figura 2.49 representa um procedimento interessante para o desenvolvimento de formas mais complexas, como abóbadas ou simples cavidades, através de um material de suporte/enchimento totalmente reaproveitável, um conceito interessante e que pode ser explorado.

Figura 2.49 - Impressão de uma peça com o auxílio de um material de suporte (betabram videos, 2017).

Características

BetAbram | País: Eslovénia | Categoria: Empresa | Ano: 2012 | Impressoras: P1, P2, P3 | Geometria do bocal: Redondo/Quadrado com espátulas | Estrutura: Grua - pórtico | Dimensões: P1 2,5x3x6 m | P2 2,5x6x12 m | P3 2,5x9x18 m | Velocidade de impressão: 300 a 500 mm/s | Ambiente de utilização: "in situ" | Material: Argamassa | Custo 10 000 a 44 000€ (betabram_videos 2015; Ribic 2018; betabram_videos 2017; Industry 2014; BetAbram 2016b).

2.3.2.8. CyBe

A CyBe, fundada em 2013, na Holanda (EIT Climate-KIC 2018), tem como principal objetivo a simplificação dos processos tradicionais de construção, acreditando que a sua otimização passará pela automatização. É sobre este fundamento que desenvolve e vende tecnologia de impressão 3D, com extrusão de betão ou argamassa (CyBe Construction 2017a).

A empresa para melhor responder às necessidades do cliente, dividiu estrategicamente as suas ofertas em software de engenharia e design, material de impressão, serviços (manutenção, formação), e impressoras (Figura 2.50). Esta variedade cobre todas as necessidades do processo de impressão em 3D (CyBe Construction 2017a).

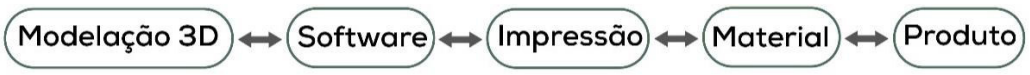


Figura 2.50 - Processo de impressão 3D com materiais cimentícios (CyBe Construction 2014).

R 3Dp

Esta primeira tipologia de impressora (Figura 2.51), apesar de utilizada para a impressão em ambientes controlados, como fábricas ou pavilhões, apresenta uma estrutura modular, de fácil transporte, com um sistema extra de elevação que permite a construção de objetos mais altos. Pode reduzir o tempo de construção em 80%, assim como as emissões de CO_2, com a utilização do material CyBe Mortar. Utiliza uma bomba no transporte do material, uma misturadora para a amassadura da argamassa e um braço robótico que garante os movimentos necessários para a deposição do material. Na figura 2.52 está presente o pormenor de uma parede impressa com a impressora RC 3Dp (CyBe Construction 2017d, 2014).

Características

Impressoras: RC 3Dp | Geometria do bocal: Retangular com espátulas | Estrutura: Braço robótico de 6 eixos com extensão de alcance em altura | Velocidade de impressão: 200 mm/s | Ambiente de utilização: Pavilhões | Operadores necessários 2 | Software: CyBe CHYSEL/CyBe ARTISAN | Material: Argamassa | Preço: 249 000€ (CyBe Construction 2017c).

Figura 2.51 - Impressora CyBe R 3Dp (CyBe Construction 2014).

Figura 2.52 - Parede impressa pela impressora R 3Dp (CyBe Construction 2014).

RC 3Dp

Com a otimização da impressora anterior surge a impressora móvel RC3Dp, (Figura 2.53), uma impressora com um braço robótico de 6 eixos acoplado a um sistema de lagartas, que lhe proporciona os movimentos necessários para a impressão de peças no exterior, para além do movimento extra possuí um

sistema de elevação que lhe permite atingir até 4,5 m de altura (CyBe Construction 2017c).

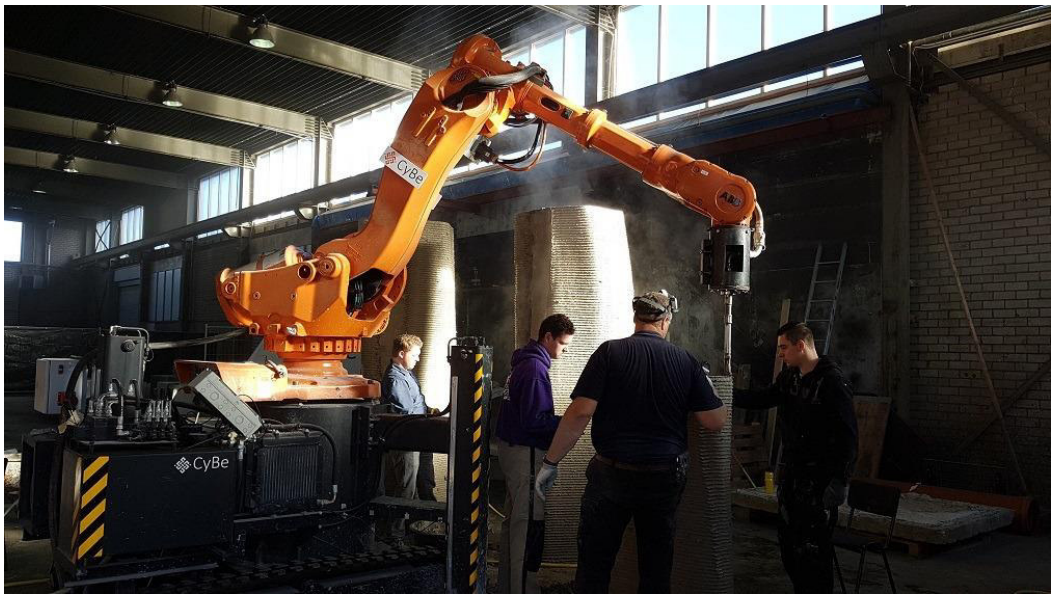


Figura 2.53 - Impressora RC 3Dp (CyBe Construction 2014).

Características

Impressoras: RC 3DCp | Geometria do bocal: Retangular com espátulas | Espessura da camada: 20 mm / 40 mm (a x l) | Estrutura: Braço robótico de 6 eixos com lagartas para movimentação e um sistema de elevação até 4500 mm | Alcance do braço de 2750 mm | Movimento: livre com altura limitada de 4500 mm | Velocidade de impressão: 200 mm/s a 600 mm/s | Ambiente de utilização: "in situ" | Operadores necessários: 2 | Software: CyBe CHYSEL/CyBe ARTISAN | Material: Argamassa | Preço: 349 000€ (CyBe Construction 2017c).

CyBe Mortar

CyBe MORTAR é um material de alto desempenho, com grande durabilidade em qualquer tipo de ambiente. Ganha estrutura em 3 minutos (Figura 3.54) e atinge boa resistência em 1 hora. Pode ser utilizado em objetos de caráter estrutural e não estrutural, desenvolvido especialmente para a utilização na impressão 3D (CyBe Construction 2017b).

Características

Cor: Cinza | Tamanho do agregado: 0-3 mm | Ganha estrutura entre 3 e 5 minutos | Densidade: 220 kg/m^3 (CyBe Construction 2017b).

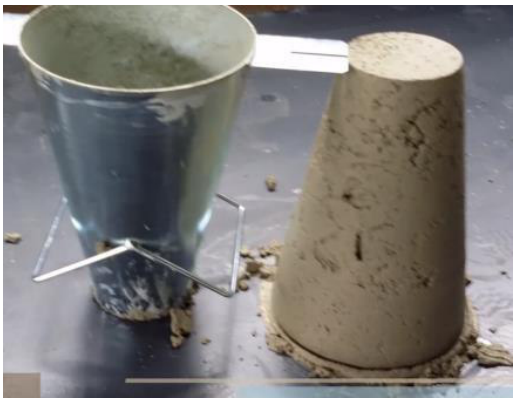


Figura 2.54 - Ensaio de abaixamento com o material CyBe Mortar (CyBe Construction 2014).

Redrone Laboratory

Construído por ordem da DEWA, Dubai Electricity and Water Authority, em maio de 2017, o Redrone Laboratory (Figura 2.55) é um edifício impresso, totalmente no local, pela impressora móvel RC 3Dp (CyBe Construction 2017e).

Figura 2.55 - Redrone Laboratory, edifício de desenvolvimento e produção de Drones, impresso pela impressora CyBe RC 3Dp (CyBe Construction 2017e).

3D House 05 | Villa

Desenhada pelo CLS Architteti em Milão para a Design Week 2018. Esta casa com 100 m^2 contém 35 elementos impressos ao longo de 46 horas. O acabamento das paredes varia entre o liso do reboco e a rugosidade das camadas impressas, visível na figura 2.56 (CyBe Construction 2018).

Figura 2.56 - Exterior e interior, respetivamente, da 3D House 05 | Villa impressa em Milão para a Design Week 2018 pela impressora CyBe RC 3Dp (CyBe Construction 2018).

Conclusões

A CyBe tal como a BetAbram é uma empresa que se dedica ao desenvolvimento de impressoras 3DCP para venda, no entanto, a sua oferta recaí sobre todos os elementos necessários para impressão: impressora, sistema de transporte, software e material. Do ponto de vista estético realçamos o acabamento entre liso do reboco, e o rugoso da impressão, um pormenor interessante que liga o design interior à estrutura da casa.

2.3.2.9. XtreeE

A XtreeE é um empresa francesa, fundada em 2015 (Linkedin 2017), que se dedica ao desenvolvimento de tecnologia de impressão 3D para os setores de Design, Arquitetura e Construção Civil (XtreeE | the large scale 3D 2018b), fornecendo produtos desde software, impressoras e material para impressão. Esta oferta é valorizada, pelo apoio de empresas, com valor reconhecido mundialmente, que partilham o seu conhecimento na área da robótica, empresa ABB; na construção Civil, a Vinci; no material, a LaFargeHolcim; e no software a Dassault Systèmes (Anes Jakupovic 201?).

O funcionamento da impressora XtreeE, assemelha-se aos anteriores sistemas da CyBe, utilizando um braço robótico de 6 eixos para deposição do material, em uma base ou mesa de impressão previamente planeada como demonstrado na figura 2.57 (Seaboost Artificial reefs 2018). A mistura da

argamassa é feita gradualmente e onde a amassadura é feita momentos antes da extrusão, para que o material mantenha as propriedades ótimas para impressão. Desde do momento em que sai pelo extrusor e entra em contacto com o ar a sua consistência é alterada, permitindo-lhe suportar as camadas superiores, no entanto o endurecimento não deve ser demasiado elevado caso contrário a aderência é comprometida (Anes Jakupovic 201?).

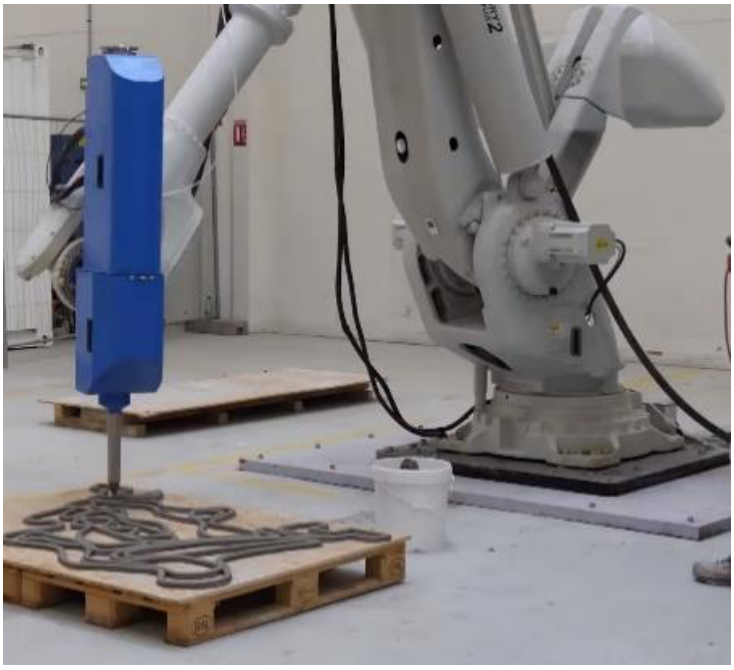


Figura 2.57 - Processo de impressão da XtreeE (Seaboost Artificial reefs 2018).

Facade Panels Prototypes

Os painéis da figura 2.58 são uma série de protótipos pensados para a ornamentação de fachadas. O processo de fabrico consiste na impressão de um contorno em betão, que funciona como uma cofragem, mas de carácter definitivo como parte integrante da peça, que posteriormente é preenchida com outro tipo de material, garantindo diferentes texturas e acabamentos (XtreeE | the large scale 3D 2018a).

Figura 2.58 - Protótipos de painéis para fachadas (XtreeE | the large scale 3D 2018a).

Rexcor Artificial Reef

A XtreeE protagonizou a impressão do primeiro recife em betão no mundo (Figura 2.59). Impresso em 2017, foi colocado no Parque Nacional de Calanques, em França, com o intuito de restaurar um habitat perdido. Este projeto contou com a participação da Seaboost, que contribuiu com o conhecimento em biologia. O resultado fixa-se em um conceito de Design completamento biomimético. Atualmente é o lar de várias espécies marinhas, confirmando a polivalência da impressão 3D com materiais cimentícios para um Design, Engenharia e Arquitetura mais ecológicos e sustentáveis (XtreeE | the large scale 3D 2017; Seaboost Artificial reefs 2018).

Figura 2.59 - Recife artificial impresso pela tecnologia de impressão 3D em betão da XtreeE (XtreeE | the large scale 3D 2017) .

A XtreeE, das empresas já estudadas, é a que apresenta impressões com formas de maior complexidade, e que melhor emprega o conceito de Design Biomimético nas suas peças, um Design inspirado na natureza para resolução de

problemas do nosso quotidiano. Apresenta também o melhor exemplo, a nível estético, da utilização do contorno impresso como cofragem e ao mesmo tempo parte estrutural da peça, que resultou na impressão dos painéis.

Características

País: França | Categoria: Empresa | Impressora: XtreeE | Ano: 2015 | Geometria do bocal: Redondo | Espessura da camada: 30 mm | Estrutura: Braço robótico de 6 eixos | Precisão de 5 mm | Alcance do braço: 4500 mm | Velocidade de impressão: 100 mm/s a 150 mm/s | Ambiente de utilização: pavilhões | Operadores necessários: 2 | Material: Argamassa (XtreeE | the large scale 3D 2018a; Seaboost Artificial reefs 2018; XtreeE | the large scale 3D 2017; Anes Jakupovic 201?).

2.3.2.10. Bruil

A Bruil é uma empresa holandesa especializada em pré-fabricados, que pretende desenvolver uma impressora 3D de betão para auxiliar a Arquitetura e o Design, na materialização de formas mais complexas, na introdução de cor e novas estruturas em materiais cimentícios (Bruil BV 2018). Estes conceitos e a preocupação com o ambiente dão origem à criação do LAB 25, um programa que pretende encaminhar a construção, até 2025, no caminho da sustentabilidade, no qual acreditam que a tecnologia de impressão 3D tem grande importância. (Bruil BV 2018).

São várias as tecnologias que pretendem desenvolver a impressão 3D na construção civil, no entanto, o carácter definitivo da superfície impressa muitas das vezes é grosseiro ou monótono com a presença de uma única cor, o cinza. Com base neste problema, a Bruil criou um tipo de material, para impressão, disponível em várias cores e com boa qualidade superficial. Para além do material, oferece um software CAD que facilmente transforma a peça modelada em camadas (Figura 2.60), de fácil leitura para a impressora, e rapidamente inicia a impressão. Consiste numa nova abordagem que privilegia a impressão de peças de design, uma vez que privilegia o acabamento (Figura 2.61) e a precisão (Alec 2016c).

Figura 2.60 - Braço da impressora Bruil em processo de impressão (Bruil 2017).

Figura 2.61 - Pormenor que demonstra a alta resolução de impressão da tecnologia Bruil (Bruil 2017).

Nas imagens seguintes estão representadas peças impressas pela Bruil, com a altura de 1,6 m, nelas está comprovado que a impressão 3D em materiais cimentícios pode ser muito mais do que camadas grosseiras de material em tons de cinza (B.V. 2016). É visível o uso de múltiplas cores, assim como, a introdução de gradientes desde a base até ao topo da peça.

Figura 2.62 – Peça impressa com o uso de várias cores (Alec 2016b).

Figura 2.63 – Peça impressa com o uso de gradiente (Alec 2016b).

Figura 2.64 - Peça impressa com o uso de gradiente (Alec 2016b).

Características

País: Holanda | Categorial: Empresa | Impressoras: Bruil | Ano: 2015 | Geometria do bocal: Redondo | Estrutura: Braço robótico de 6 eixos | Ambiente de utilização: Pavilhões | Operadores necessários: 2 | Material: Argamassa (Bruil 2017; Alec 2016b; Bruil BV 2018).

O método de impressão é semelhante aos processos de impressão anteriores, que utilizam braços robóticos de 6 eixos. A maior inovação desta tecnologia passa pelo material que utiliza, sendo o único que possui várias cores. Para além da capacidade de impressão em várias cores, é relevante salientar o uso de gradientes na impressão, um pormenor de extrema dificuldade, que mais uma vez promove a inclusão da tecnologia no Design.

2.3.2.11. Wasp

Em 2003, Massimo Moretti, cria a empresa CSP (Centro Sviluppo Progetti), que procura encaminhar a indústria no caminho da sustentabilidade. Este fundamento lançou a empresa no projeto WASP (World's Advanced Saving Project), que tem por base a tecnologia de impressão 3D. Atualmente, a empresa é conhecida pelos seus modelos de impressoras Delta, que privilegiam a impressão em altura (WASP, 2017b).

Este modelo, após conquistar o seu espaço na impressão em FDM, com polímeros e bio polímeros, e mais recentemente com argila, lança-se em 2015 na

impressão 3D em grande escala, com a impressora Delta Big 66 ou BigDelta, mudando o conceito de FDM (material extrusion) para LDM (Liquid Deposition Molding). Uma impressora de conceito totalmente ecológico, com baixos consumos de energia, e parcialmente alimentada por painéis solares, pode imprimir com vários tipos de materiais desde compósitos naturais, feitos através de materiais do local (misturas de palha, argila e terra), a materiais cimentícios. A extrusão é feita graças ao seu extrusor cónico com um parafuso de Arquimedes, figura 2.65 (WASP 2017b). O seu abastecimento é feito manualmente como o demonstrado na figura 2.66. Apesar de menor pragmatismo o sistema manual elimina problemas com o transporte de material desde a amassadura até ao extrusor. A amassadura é feita por uma misturadora que pica/tritura e amassa os materiais à medida que os vai mexendo com as pás, visível na figura 2.67 (WASP 2016).

Figura 2.65 - Extrusor da impressora Delta Big 66 (WASP 2017a).

Figura 2.66 - Processo de abastecimento do extrusor da Delta Big 66 (WASP 2017a).

Eremo

Eremo, um pequeno edifício (Figuras 2.68, 2.69 e 2.70), impresso com os materiais existentes no local (terra, argila, palha) (WASP 2017c), é um exemplo de habitação de baixo custo, que a impressão 3D pode proporcionar. Neste caso com um custo total de 48€, dos quais 35€ são consumo de energia e os restantes

13€ em material, inclusive água. A impressão conta com 135 camadas impressas a uma velocidade média de 20 minutos por camada (WASP 2017d).

Figura 2.67 - Processo de amassadura do material (WASP, 2017c).

Figura 2.68 - Bocal de extrusão, impressora Big Delta 66 (WASP, 2017d).

Figura 2.69 - Colocação de estrutura em madeira para suportar o telhado (WASP, 2017d).

Figura 2.70 - Imagem final da habitação Eremo (WASP, 2017d).

Em 2016, a Wasp lança um projeto inovador e de caráter social, intitulado de Maker Economy Starter Kit, um conceito que privilegia tecnologias de fabricação aditiva, acessíveis a todos, que permitirá a comunidades isoladas satisfazerem as suas necessidades humanas primárias como: casa, energia, comida, saúde, trabalho e cultura. Este tipo de dinâmica resultaria num contentor (Figura 2.71) equipado com equipamentos da WASP (1 impressora Big Delta Wasp 12m, Delta Wasp 3m, Delta Wasp 40 70, Delta Wasp 20 40, Clay Kit, Top Wasp DLP, ferramentas e matéria prima, SD Card), e uma plataforma online de troca de conhecimentos, que aumentariam a produção individual e tornariam as comunidades isoladas mais independentes (WASP 2017e).

Figura 2.71 - Impressor Delta Big Wasp 66 (WASP 2017c).

Pela primeira vez conseguimos visualizar com algum detalhe o processo de amassadura e abastecimento, onde a misturadora esmaga e tritura pedaços de palha para a conceção do compósito natural. O sistema de transporte é o único processo não automatizado, sendo feito manualmente com recurso a um balde. Esta tecnologia privilegia ao máximo a componente ecológica, produzindo peças com forte ligação ao local, motivando o consumo de materiais locais e diminuindo a dependência de algumas comunidades isoladas.

Características

País: Itália | Categoria: Empresa | Impressora: Delta Big 66 | Ano: 2015 | Geometria do bocal: Redondo | Extrusor: Cónico com parafuso de Arquimedes | Estrutura: Pórtico | Precisão de 5 mm | Área de impressão: 32 m^2 | Velocidade de impressão: 400 mm/s; Ambiente de utilização: "in situ"; | Operadores necessários: 2 | Material: Argamassa e compósitos naturais (WASP 2017c; WASP 2017a, 2016; WASP 2017d, 2017e).

2.3.2.12. Andrey Rudenko

Andrey Rudenko, Mestre em Engenharia Civil e Arquitetura, pela Russian State University (Andrey Rudenko e 201?), é atualmente um dos maiores impulsionadores da tecnologia de impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios. Criador da empresa Total Kustom, em Minesota, construtora de impressoras 3D, precisas e leves, que privilegiam a qualidade de impressão e facilitam o seu transporte, para a impressão "in situ" (Kustom 201?-b). Atualmente possuem 4 tipologias de impressoras (Stroybot, LAByrinth,

SEVEReBOT, SEVEReBOT Max), e uma última versão em fase de protótipo que ainda não está disponível, mas que promete a impressão de torres até 100 metros de altura. Cada tipologia de impressora possuí 2 opções uma em aço e outra em compósitos de Kevlar e carbono, os preços desde a mais barata até à mais cara variam entre os 300 mil e os 5 milhões de dólares, variando também a sua estrutura desde braços robóticos até impressoras de pórtico (Kustom 201?-c).

Ambas as tipologias de impressoras foram criadas e projetadas sobre o funcionamento da primeira impressora a Storybot. Este modelo partiu do conceito de uma pequena impressora FDM, projetado pelo próprio Andrey Rudenko, com conhecimentos obtidos através da comunidade RepRap. Utiliza um pórtico para movimentar o extrusor por dois eixos horizontais x e y e um eixo vertical z, em tudo semelhantes às tecnologias anteriormente abordadas.

Após a construção da impressora segue para a conceção do material, uma argamassa à base de cimento (Figura 2.72). Inicialmente a argamassa entupia o sistema, obrigando Rudenko a alterar a sua conceção, embora não seja divulgada a fórmula da argamassa sabemos que o problema foi resolvido com a sua otimização, apresentando apenas problemas na impressão em locais de elevadas temperaturas, que aceleram o ganho de presa da argamassa (Rudenko 2014a, 2014b).

Durante o processo de impressão (Figura 2.73 e 2.74) serão necessárias duas pessoas para garantir o bom funcionamento, uma com conhecimentos de informática para controlo da impressora e outra com conhecimentos do material para garantir as propriedades para impressão. O objetivo será obter uma cofragem em betão, definitiva, onde posteriormente será betonado betão, que garantirá a resistência e o isolamento necessário no caso de habitações (Rudenko 2014b).

Figura 2.72 - Areia utilizada na elaboração da argamassa (Rudenko 2015).

Figura 2.73 - Impressora Stroybot em processso de impressão no interior (Rudenko, 2015).

Figura 2.74 – Extrusor da impressora Stroybot em processo de impressão no exterior (Rudenko, 2015).

The Castle by 3D Printer

Dois anos foi o período que Rudenko levou na otimização da impressora e do material, em 2016 é impressa a obra que lhe iria dar visibilidade, um castelo com dimensões consideráveis. Inicialmente foi difícil estabelecer uma dimensão entre largura e a altura das camadas, o padrão final estabilizou-se pelos 30 mm de largura e 10 mm de altura. O castelo foi impresso em várias peças, em média com 500 mm de altura (Figura 2.75 e 2.76).

Figura 2.75 - Castelo impresso em betão por Andrey Rudenko (Kustom 201?-a).

Figura 2.76 - Topo das torres do castelo antes da sua montagem no edifício (Rudenko 2014a).

Lewis Grand Hotel

O bom desempenho de Rudenko na impressão do castelo, com uma impressora de baixo custo, lançaram-no na construção de uma extensão de um importante hotel nas Filipinas, o Lewis Grand Hotel. Este projeto obrigou a equipa a preparar uma nova mistura de material, devido às características dos materiais do local e às temperaturas elevadas. O resultado final materializou-se numa construção com 130 m^2, tendo no seu interior um jacúzi, também impresso ao mesmo tempo que a estrutura do edifício, como mostra a figura 2.77 (Alec 2015).

Figura 2.77 - Pormenor da impressão de um jacuzzi no interior do hotel junto com parte da sua estrutura.

Andrey Rudenko é a prova de que a uma impressora 3D de materiais cimentícios pode ser construída com pequenos orçamentos. Rudenko parte da paixão que possuí e dos seus rendimentos para o desenvolvimento da sua impressora, guiado pela comunidade RepRap, uma comunidade que partilha conhecimentos e venda de material destinado ao desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D nas mais diversas áreas. Neste projeto é pela primeira vez referenciado um bloqueio do material no sistema de transporte, que resultou na otimização do material perante o sistema de impressão existente. Por último a

construção do castelo em vários elementos de 50 cm, apresenta uma solução que pode vir a ser explorada por impressoras de pequeno porte.

Atualmente, a tecnologia desenvolvida com materiais de ponta, apresenta uma vasta gama de impressoras, conjugadas com a experiência adquirida na impressão de importantes projetos.

Características

País: EUA | Categoria: Projeto privado | Ano: 2015 | Impressoras: Stroybot | Geometria do bocal: Redondo | Estrutura: Grua - pórtico | Precisão de 1 a 2 mm | Área de impressão: 150 m^2 | Pessoal necessário: 2 | Ambiente de utilização: "in situ" | Material: Argamassa | Custo: 300 000 a 5 000 000 $ (Rudenko 2015, 2014b; Kustom 201?-c; Rudenko 2014c).

2.3.2.13. Alex LeRoux

A maior parte dos projetos referenciados neste documento são alvo de grandes investimentos e equipados com alta tecnologia, no entanto, Alex LeRoux, um estudante de Houston, criou no final de 2015 a sua própria impressora 3D de extrusão de materiais cimentícios, a V2 Vesta 3D, com recurso a materiais simples (Alec 2016a), e com um custo total de 2500$ (Joel 2013-2018).

Este equipamento é capaz de imprimir no local, ao contrário de muitas impressoras que o efetuam em pavilhões com o ambiente controlado. Para além disso, é capaz de ser configurada em 30 minutos o que aumenta a sua versatilidade. A nível estrutural apresenta um pórtico que suporta e movimenta o extrusor nos eixos x, y e z (Alec 2016a).

A Figura 2.78 representa a impressora de LeRoux, e uma pequena habitação com 2x1.5x2 m, impressa no prazo de 24h, a uma velocidade média de 300 mm/s, nos eixos x e y (Doris 2016).

Figura 2.78 - Impressora V2 Vesta 3D em processo de impressão no exterior, e habitação impressa (Alec 2016a).

Do trabalho de LeRoux podemos salientar o pequeno orçamento com que foi desenvolvida a impressora.

Características

País: EUA | Categoria: Projeto privado | Ano 2015 | Impressora: V2 Vesta 3D printer | Velocidade de impressão: 300 mm/s | Espessura das camadas: 7,5 mm | Estrutura: Pórtico | Ambiente de utilização: "In situ" | Material: Argamassa | Custo: 2500$ (Alec 2016a; Joel 2013-2018; Doris 2016).

2.3.2.14. Apis Cor

Fundada em 2014 por Nikita Chen-yun-tai, e sediada em Moscovo, a Apis Cor é uma empresa especialista em construção, robótica e impressão 3D em matérias cimentícios (apis cor 2016c). A ambição de automatizar a indústria global, em prol de uma produção mais rápida, ecológica, eficiente e confortável resulta no desenvolvimento de uma impressora de construção móvel, a Apis Cor 3D printer (apis cor 2016b).

A impressora possuí uma estrutura diferente das anteriores, aqui o conceito baseia-se em uma grua de construção (Figura 2.79), onde a cabeça de extrusão se encontra acoplada ao seu braço telescópico que lhe proporciona uma área de impressão de 132 m^2. Essa estrutura é completamente desmontável e pode ser transportada em um contentor, tal como a impressora Big Delta Wasp 66. Depois de armada, é colocado um sensor ultrassónico no extrusor para que este faça o levantamento da rugosidade da superfície onde será feita a impressão, feito o reconhecimento será preparado o terreno para iniciar a impressão, onde primeiramente, são impressas as fundações, sendo seguidas das paredes. Podemos observar dois modelos de paredes nas figuras 2.80 e 2.81 uma sem caixa-de-ar para isolamento e outro com, respetivamente. No final de cada impressão é feita a lavagem de todo o equipamento para evitar entupimentos na impressão seguinte (apis cor 2016a). Os acabamentos do edifício são feitos com ajuda dos operadores, desde a canalização até à instalação elétrica (apis cor 2016a).

Figura 2.79 - Impressora apis cor (apis cor 2016b).

Figura 2.80 - Pormenor de parede impressa pela apis cor, com um filamento de reforço no interior (apis cor, 2016d).

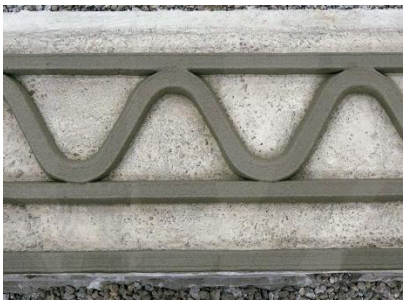


Figura 2.81 - Pormenor de uma camada destinada à impressão de uma habitação, com um filamento externo que serve para isolamento (apis cor 2017b).

Atualmente a empresa está a trabalhar para ser a primeira a construir na superfície de Marte, acreditando que a solução passa pela impressão 3D, conta como concorrentes já referenciada Contour Crafting de Khoshenevis, uma competição lançada pela NASA com o programa: "Nasa's Phase III 3D Printed Habitat". Nesse âmbito tem desenvolvido novos materiais (Figura 2.82) como Geobetões com o intuito de aumentar a durabilidade da impressão em ambientes extremos (apis cor, 2017a).

Figura 2.82 - Peça impressa com novos materiais desenvolvidos pela apis cor (apis cor, 2017a).

Em 2017 foi impressa uma habitação (Figura 2.83) com cerca de 122 m^2 em apenas um dia, sem desperdício de material e com uma durabilidade de 175 anos (Ingalls, 2017), equipada com água, eletricidade e com acabamentos de uma habitação comum, reboco, pintura entre outros, feitos por processos tradicionais (Apis Cor, 2017).

Figura 2.83 - Processo de construção, exterior e interior da habitação, respetivamente (apis cor 2017a).

Uma impressora talhada para a impressão em grande escala, com uma área de impressão de 132 m^2, e com a possibilidade de ser conjugada com outras impressoras semelhantes (Figura 2.84). Apesar da sua mais-valia na construção em grande escala, a precisão que possui também possibilita a criação de peças de pequeno e médio porte, com bom acabamento, que privilegia a criação de peças complexas e esteticamente interessantes.

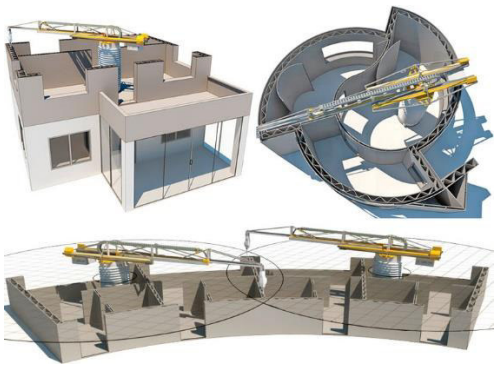


Figura 2.84 - Esquema que demonstra o alcance de uma impressora apis cor, assim como a possibilidade de trabalhar em conjunto com outra impressora apis cor (apis cor, 2017a)

Características

País: Rússia | Categoria: Empresa | Nome da impressora: apis cor || Área de Impressão: 132 m2 | Dimensões desmontada: 4000x1600x1500 mm | Dimensões máximas: 5600x2600x2600 mm | Velocidade máxima de impressão: 167 mm/s | Precisão: 0,1 a 0,5 mm eixo x/y e 0,5 mm eixo z | Geometria do bocal: Quadrangular | Estrutura: Grua | Energia necessária: 8 Kw | Pessoal necessário: 2 pessoas | Ambiente de utilização: "In situ" | Material: Argamassas (apis cor 2016a).

2.3.2.15. Constructions-3D

A Construtions – 3D, é uma Start Up francesa, que surge em força em 2017, com a otimização de toda a sua oferta em impressão 3D com materiais cimentícios. Este desenvolvimento resulta em uma oferta de impressão completa, que proporciona a edificação rápida, segura e econômica em qualquer local, assim como, maior liberdade geométrica (Construtions-3D 2018a).

A impressora 3D Constructor (Figura 2.85), é uma impressora de extrusão de betão capaz de imprimir "in situ", o seu braço telescópio e as suas pernas hidráulicas proporcionam-lhe uma área de impressão de 265 m^2, no entanto, existe um modo que privilegia a precisão e acabamento para peças de menor porte, diminuindo a área de impressão para 140 m^2, mas aumentando a precisão de 10 mm para 5 mm (Figura 2.86). Como todas as outras impressoras, necessita de outros componentes para mistura e transporte de material, utiliza uma bomba e um silo, com capacidade de 1,2 m^3 de material, e que proporciona 4h de impressão contínua (Construtions-3D 2018c).

Figura 2.85 - Impressora 3D Construtor (Construtions-3D 2018a).

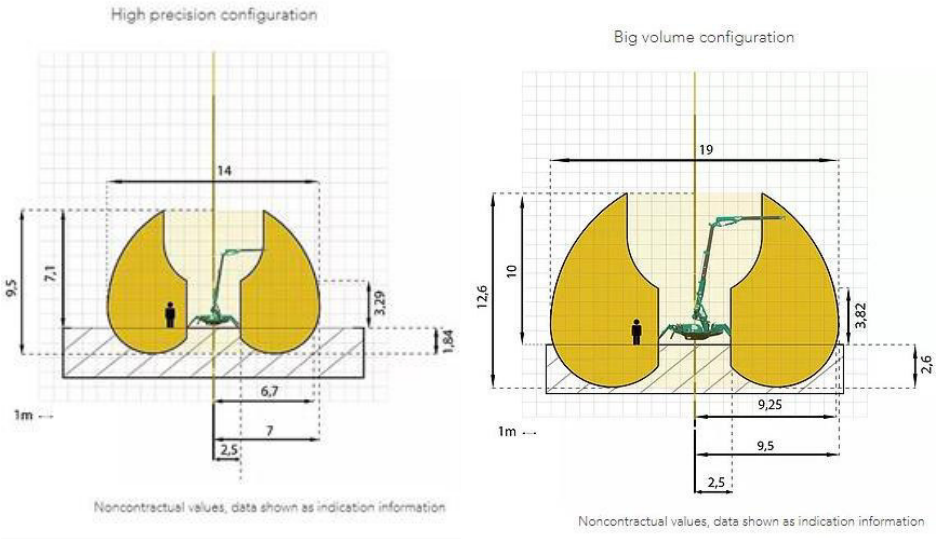


Figura 2.86 - Modo de precisão máxima e volume máximo da impressora 3D Construtor, respetivamente (Construtions-3D 2018c).

Todos os componentes podem ser transportados em um contentor, tal como já referenciado em tecnologias anteriores. Esta versatilidade oferece à impressora a facilidade de imprimir no local. No deslocamento da impressora são gastos (tempo baseado somente no trabalho de duas pessoas): 4:30h na montagem de todo o equipamento; 1h para iniciar a impressão; 3h:30 para desmontar e arrumar e 1h:30 para limpeza do sistema (Construtions-3D 2018c).

O material é elaborado tendo por base uma argamassa de cimento, que proporciona a impressão em ambientes desde os 5° até aos 35°C, sendo que, em temperaturas superiores ou inferiores a trabalhabilidade do material irá ser alterada, podendo resultar em entupimentos do sistema ou então em fluidez

muito elevadas. Apresenta ainda uma resistência de 75 MPa e um tempo de presa desde dos 60s até 1h:30. A granulometria do seu agregado pode ir até 6mm e a quantidade de água necessária para 100 kg de argamassa é de apenas 12l (Construtions-3D 2018c).

A Constrution 3D ainda não possuí um projeto de grande dimensão, no entanto, tem como demonstração um conjunto de peças com grande diversidade geométrica, tamanho e função. Testa ainda bocais de vários diâmetros adaptando-os ao tamanho do objeto, o sistema de rosca que prende o bocal facilita a sua de troca.

A construction 3D apresenta uma oferta semelhante à Wasp, embora com conceitos de impressoras diferentes, ambas apresentam um contentor com todo o material necessário para impressão no local (Figura 2.87). O modo de precisão da impressora privilegia a impressão de peças pequenas e médias, como as dispostas nas imagens anteriores (Figura 2.88, 2.89, 2.90, 2.91), o que mostra a sua utilidade para o design.

Figura 2.87- Vista de todos os componentes necessários para realizar uma impressão (controlador, impressora, silo e mecanismo de mistura e transporte), no valor de 495 000 € (Construtions-3D 2018d).

Figura 2.88 - Recife, 80x70x60 cm, 250 kg, camadas de 20 mm de altura impressa em 32 min (Construtions-3D 2018b).

Figura 2.89 - Banco urbano, 200x80x50 cm, 450 kg, camadas de 20 mm de altura, impresso em 55 min (Construtions-3D 2018b).

Figura 2.90 - Cadeira urbana, 80x70x60 cm, 110 kg, camadas com a altura de 15 mm, impresso em 14 minutos (Construtions-3D 2018b).

Figura 2.91 - Protótipo de parede, 150x30x90 cm, 550 kg, camadas com altura de 10 mm, impresso em 1h03 (Construtions-3D 2018b)

Características

País: França | Categoria: Start Up | Ano: 2017 | Nome da impressora: 3D Construtor | Área de impressão: 265 m^2 | Dimensões desmontada: 3000x850x2000 mm | Velocidade de impressão: 20 a 300 mm/s | Amplitude do bocal: 15 a 50 mm | Espessura das camadas:10 a 20 mm | Cabeça de deposição: Redonda | Estrutura: Braço telescópico com extensões hidráulicas e rodas com lagartas | Precisão: 5 a 10 mm | Movimento: Rodas em lagartas | Granulação máximas: 6 mm | Pessoal necessário: 2 | Ambiente de utilização: "In situ" | Material: Argamassa | Custo: 495 000€ (Construtions-3D 2018c).

2.3.2.16. 3D Printhuset

A Printhuset, uma empresa de venda de equipamentos e serviços de impressão 3D, sediada na Dinamarca, lançou em 2017 o projeto BOD (Building On Demand), um pequeno escritório que seria impresso pelos seus protótipos de impressoras 3D com materiais cimentícios. Este projeto resultou na impressão do primeiro edifício na Europa, que cumpre todas as normas de construção (Clare Scott 2017).

A empresa possui 4 tipologias de impressoras, diferenciadas pelo tamanho, e pelo número de eixos de cada uma, o modelo BOD2 – 483 será o escolhido para análise, sendo a impressora de maior porte e com o maior número de eixos (Printhuset 2018). O funcionamento desta impressora é equivalente a todos os sistemas que utilizam uma estrutura grua-pórtico, no entanto, possuí algumas particularidades. O extrusor cónico com parafuso de Arquimedes é semelhante ao da impressora Big Delta Wasp 66. No bocal utiliza uma peça que altera a sua forma de saída para retangular, semelhante a duas espátulas. No seu interior existe uma aresta dentado, que "penteia" a superfície superior da camada (Figura 2. 92), aumentando a aderência da camada seguinte (Printhuset 2017a).

Quanto ao material, argamassa, a sua amassadura e transporte são realizados gradualmente e automaticamente, permitindo que o sistema efetue uma impressão continua até ao final da peça (Printhuset 2017b). Esta argamassa apresenta um caracter ecológico, aproveitando desperdícios de telha como agregados para a sua composição, juntamente com a areia (Clare Scott 2017).

Figura 2.92 - Pormenor do bocal com aresta dentada (Printhuset 2017a), extrusor com parafuso de Arquimedes, da impressora BOD2-483 (Printhuset, 2017b), imagem da impressora BOD2 em processo de impressão (Printhuset, 2017a).

O objetivo desta empresa é a construção, procurando imprimir segundo as normas estipuladas. Embora condicionada pelas normas de construção estipuladas na Europa, podemos verificar no edifício BOD (Figura 2.93) que o uso de formas arredondadas origina muitos problemas à construção tradicional, o que revela algumas das mais-valias da tecnologia.

Figura 2.93 - Construção do edifício BOD e render da construção final, respetivamente (Printhuset 2017a).

Características

País: Dinamarca | Categoria: Empresa | Ano: 2017 | Nome da impressora: BOD2-483 | Estrutura: Pórtico | Área de impressão: 185 m^2 | Geometria do bocal: Retangular | Extrusor: Cónico com parafuso de Arquimedes | Acabamento: Espátulas | Altura máx. de impressão: 5,8 m | Velocidade de impressão: 300 mm/s | Material: Argamassa (Clare Scott 2017; Printhuset 2017b, 2018).

2.3.2.17. TU Eindhoven

O programa 3D Concrete Printing da Universidade de Eindhoven, é um programa que explora a impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, este programa tem permitido o desenvolvimento de teses e projetos por parte dos alunos, apoiados por empresas como a Weber, Beamix e CyBe, uma das grandes empresas da área (TU/e 2018b).

A Universidade de Eindhoven apresenta uma impressora tipo grua-pórtico à semelhança das anteriores, sendo o sistema de mistura e transporte também automatizados (TU/e 2018b).

Um dos projetos da Universidade é a ponte da figura 2.94, um projeto que se encontrava a cargo da empresa BAM Infra Construction, mas cuja impressão foi feita nas instalações da TU Eindhoven, com o recurso à sua tecnologia de impressão. A ponte é composta por 6 elementos, impressos horizontalmente e mede cerca de 6,5 m de comprimento e 3,5 m de largura (TU/e 2018a).

O ponto de maior relevância neste projeto é o conceito da impressão 3D conjugado com sistemas tradicionais de construção, o exemplo espelha essa

combinação de processos (Figura 2.94), com a divisão da ponte em 6 pequenos tabuleiros, que posteriormente, são montados com cabos de aço pré-esforçados, tal como em processos tradicionais de construção.

Figura 2.94 – Instalação da ponte no local da obra (TU/e 2018a).

Características

País: Holanda | Categoria: Universidade | Nome da impressora: 3DCP | Medidas da impressora: 9x4,5x3 m | Estrutura: Grua-pórtico com braço robótico | Ambiente de utilização: Pavilhão | Material: Argamassa (desenvolvido em colaboração com empresas como: Weber, Beamix e CyBe).

2.3.2.18. Lund University

Este projeto nasce da vontade Olaf Diegel, chefe do departamento de desenvolvimento de produtos da universidade de Lund, na Suécia, conjugado elementos da universidade de Lund, que dá início a uma serie de conversações com a empresa Hesimborg Hem, uma construtora local, para a construção de uma impressora 3D de betão (3DR Holdings 2015).

O início do projeto teve por base uma impressora de pequenas dimensões, devido ao rigoroso orçamento. A sua estrutura baseia-se em um braço robótico, ABB IRB140 de 6 eixos, acoplado em um pórtico construído a partir de perfis, e acoplado sobre 4 rodas que garantem a sua mobilidade. A estrutura tem um volume de impressão de 910x676x1384 mm^3. O transporte do material até ao bocal é feito por um trado (parafuso de Arquimedes) de 100 mm de diâmetro, a sua alimentação é feita por uma entrada lateral que permite a colocação do

material manualmente ou por um sistema automatizado, visível na figura 2.95 (3DR Holdings 2015; Anell 2015).

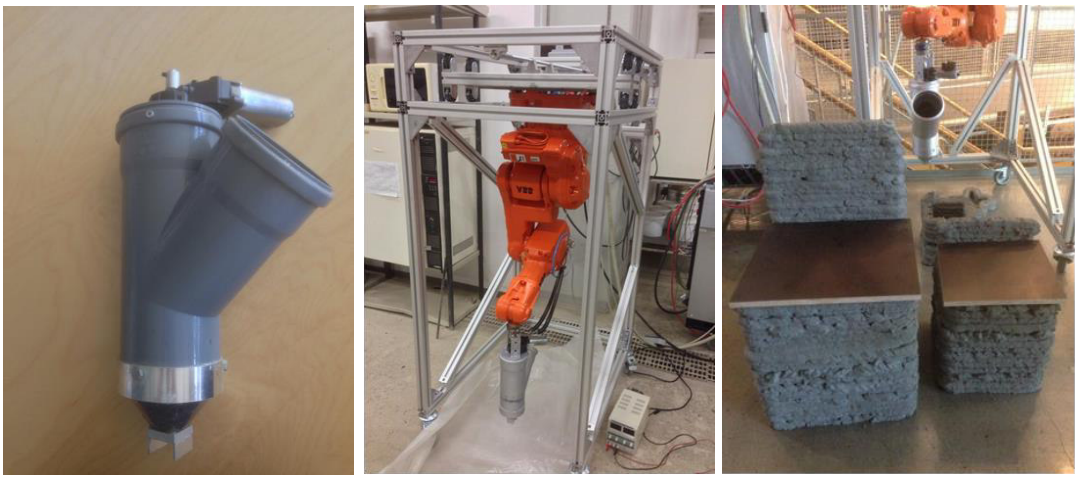


Figura 2.95 - Extrusor com pormenor da entrada lateral para admissão de material, estrutura completa da impressora e um conjunto de cadeiras impressas pela tecnologia, respetivamente (Anell 2015).

O material utilizado para experimentação da impressora, baseia-se na composição de um betão leve EPS, um tipo de betão que substituí os agregados mais grossos como a brita por poliestireno expandido. O filamento de material extrudido resulta em camadas entre os 30-40 mm de largura e 10-20 mm de altura sendo que a abertura do bocal é quadrangular com 35 mm (3DR Holdings 2015; Anell 2015).

De todas as tecnologias estudadas e brevemente analisadas, este projeto da Universidade de Lund, na Suécia, é o que mais se assemelha à nossa realidade. O pragmatismo com que foi feito um extrusor a partir de tubos de PVC e um parafuso de Arquimedes, demonstra que nem sempre é necessário grande investimento para iniciar a impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios. A chegada de material à cabeça de extrusão é feita manualmente por uma abertura lateral, assim sendo o caminho de transporte passa apenas pelo comprimento do extrusor, o que evita entupimentos e diminui os gastos em equipamento.

Características

País: Suécia | Categoria: Universidade | Nome da impressora: 3DCP | Medidas de impressão: 910x676x 1384 mm^3 | Estrutura: Grua-pórtico com braço robótico | Camada: Largura- 30 a 40 mm e altura- 10 a 20 mm | Ambiente de utilização: Pavilhão | Material: Betão EPS (Anell 2015; 3DR Holdings 2015).

2.4. Composições de Argamassas para Impressão

Apesar de já existir literatura vasta sobre a impressão 3D com materiais cimentícios, em geral, não são revelados muitos detalhes sobre a composição das argamassas utilizadas. Bos et al. (2016) sugerem para materiais constituintes os seguintes: Cimento Portland (CEM I 52,5 R); agregado silicioso, com granulometria de 1 mm de diâmetro; fíler calcário, como material de enchimento, e aditivos para facilitar o bombeamento; modificadores reológicos para obtenção de tixotropia na argamassa fresca; a incorporação de fibras de polipropileno para a redução de fissuras, devido a secagens precoces.

Na Tabela 2.3 apresentam-se algumas argamassas utilizadas para impressão 3D, encontradas na literatura. Verifica-se que, em geral, são materiais que atingem resistências relativamente elevadas nas primeiras idades, os materiais finos são constituídos por uma mistura de cimento e outras adições pozolânicas, e que para além do uso de superplastificantes é frequente o recurso a adjuvantes retardadores.

Tabela 2.3 - Exemplos de alguns materiais cimentícios, utilizados em impressão 3D.

Material	Criador	Constituintes	Características	Referências
Argamassa	CyBe	Cimento, areia; (...)	Resistência à compressão de 25 MPa (1 dia); disponível em várias cores	(CyBe Construction 2017b)
Argamassa	Lund University	Cimento, areia, cinzas volantes, sílica ativa, água, retardadores, superplastificante	Resistência à compressão de 105 MPa e à tração de cerca de 13 MPa	(Anell 2015)
Argamassa	Weng, Li, Tan, Qian.	Cimento, sílica ativa, areia de sílica, cinzas volantes, areia de rio, água, superplastificante	A melhor composição, obtida com estes constituintes, atinge resistências à compressão de 60 MPa, e à flexão de 4,5 MPa (28 dias)	(Weng et al. 2018)
Argamassa	Hwang e Khoshnevis	Cimento, areia, água, superplastificante	Resistência à compressão de aproximadamente 19 MPa (7 dias)	(Hwang e Khoshnevis 2004)

2.5. Análise / Reflexão

Após análise das tecnologias de impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, podemos enumerar alguns tópicos que são de grande importância para o desenvolvimento do caso prático. As conclusões serão apresentadas segundo: estrutura de cada tecnologia, processo de impressão, materiais utilizados e peças impressas.

Quanto à estrutura das impressoras variam, maioritariamente, entre sistemas de grua-pórtico ou braços robóticos de 6 eixos, ou a combinação de ambos. O sistema de grua-pórtico promove áreas de impressão maiores, enquanto os braços robóticos promovem precisão, rapidez e liberdade de movimentos. Algumas delas como a CyBe possuem impressoras móveis que privilegiam a impressão "in situ". Os bocais podem possuir secções transversais retangulares com espátulas que privilegiam o acabamento, ou de secção

transversal redonda que privilegia a rapidez e liberdade geométrica. Os bocais de secção transversal retangular necessitam de um braço robótico para manter a geometria do filamento, uma vez que a largura é diferente do comprimento.

Os materiais utilizados são na maioria dos casos argamassas de alto desempenho que ganham presa em poucos minutos. Devem ser projetadas tendo como base o sistema de impressão, pois é necessário extrudir o material no momento em que atinge as propriedades ótimas para impressão, caso contrário pode causar abatimentos das camadas, na peça, ou entupimentos no sistema de transporte. Para aumentar a sustentabilidade do material, diminuindo a utilização de cimento, podem ser introduzidos resíduos de construção ou outros resíduos industriais. A nível estético existe também a possibilidade de introdução de cor no material, como o utilizado pela Bruil. Por último, deve ser considerado que a temperatura tem influência direta no comportamento da material.

Após visualizar os vários métodos de impressão de cada tecnologia, adquirimos alguns pormenores úteis para utilização no caso de estudo. A utilização de vazios na estrutura pode diminuir o peso da peça, assim como, pode funcionar de cofragem para o preenchimento com outros materiais, criando peças com vários tipos de textura. A superfície de impressão tem influência na primeira camada, sendo que quanto menos atrito tiver a superfície maior será o abatimento da camada. A utilização de areia como material auxiliar na impressão, servindo de suporte, poderá aumentar a liberdade geométrica da peça.

Das peças apresentadas as que ganham maior destaque são as peças impressas pela XtreeE, caso dos recifes e dos painéis ornamentais, que exemplificam as formas orgânicas e complexas, que com uso de armadura ou cofragem eram impossíveis ou muito difíceis de obter. As peças impressas pelo Bruil com a utilização de cor também demonstram o potencial estético da impressão 3D.

Por último, é de salientar que as impressões da maior parte das peças apresentadas durante a revisão de literatura não apresentaram desperdícios de material, o que demonstra o potencial da tecnologia no fabrico de peças com materiais cimentícios.

Na tabela seguinte, resumem-se as características principais de cada tecnologia analisada durante a revisão da literatura, tendo por base todas as especificações fornecidas pelas empresas, universidades, startups, e o artigo de Duballet, Baverel e Dirrenberger (2017) sobre a classificação de tecnologias de impressão em betão. O símbolo - significa que não foi encontrada informação.

Tabela 2.4 – Características principais das tecnologias de impressão analisadas.

	Categoria	Impressora	Estrutura	Área de impressão (m^2)	Movimento	Espátula	Velocidade de impressão (mm/s)	Geometria do bocal	Operadores	Espessura da Camada (mm)	Ambiente de impressão	Ano	Material	Custo
Contour Crafting	Empresa	Contour Crafting	Grua-pórtico + Braço robótico	-	-	✓	-	Redondo e Retangular	-	-	"in situ"	2004	Argamassa	-
L. University	Universidade	3DCP	Grua-pórtico	24	-	-	600	Redondo	-	-	Pavilhão	2007	Argamassa e gesso	-
BetAbram	Empresa	[1]P1 / [2]P2 / [3]P3	Grua-pórtico	-	-	✓	300 a 500	Redondo/ quadrado	2	-	"in situ"	2012	Argamassa	10 000 a 44 000€
IAAC	Universidade	Base Robot Grip Robot [3]Vacuum Robot	Mini robôs	Limitada à capacidade de bombeamento	Móvel	-	-	Redondo	-	-	"In situ"	2013	Argamassa	-
CyBe	Empresa	[1]R 3Dp [2]RC 3Dp	[1]Braço robótico [2]Braço robótico com lagartas	-	[2] Móvel	✓	200 a 600	Retangular	-	-	[1] Pavilhão [2] "In situ"	2013	Argamassa	249 000 a 349 000€
Apis Cor	Empresa	Apis Cor	Grua	132	Transportável	✓	167	-	2	-	"In situ"	2014	Argamassa	-
WinSun	Empresa	-	Grua-pórtico	-	-	✓	-	Retangular	-	6 a 30	Pavilhão	2015	Argamassa	-
XtreeE	Empresa	-	Braço robótico	20	-	-	100 a 150	Redondo	2	30	Pavilhão	2015	Argamassa	-
Bruil	Empresa	-	Braço Robótico	-	-	-	-	Redondo	2	_	-	2015	Argamassa	-
Andrey Rudenko	Projeto	Stroybot	Grua-pórtico	-	-	-	-	Redondo	2	30	"In situ"	2015	Argamassa	300 000 a 5 000 000$
Alex Le Roux	Projeto	V2 Vesta	Grua-pórtico	-	-	-	300	Redondo	-	7.5	"in situ"	2015	Argamassa	2500$
Wasp	Empresa	Delta Big 66	Braços Robóticos	32	Transportável	-	400	Redondo	2	-	"in situ"	2015	Argamassa e compósitos naturais	-
3D Construction	Startup	3D Constructor	Braço telescópico	265	Transportável	-	300	Redonda	2	10 a 20	"In situ"	2017	Argamassa	495 000€
3D Printhuset	Empresa	BOD2-483	Grua-pórtico	185	-	✓	300	Retangular	-	-	Pavilhão	2017	Argamassa	-
TU Eindhoven	Universidade	3DCP	Grua-pórtico	41	-	✓	-	-	-	-	Pavilhão	2015	Argamassa	-
Lund University	Universidade	3DCP	Grua-pórtico + Braço robótico	0,62	-	✓	-	Retangular	-	-	Pavilhão	2015	Betão EPS	-

Capítulo 3

3. Caso de Estudo

Neste capítulo, foi explorado o conceito de impressão 3D através da extrusão de materiais cimentícios. Na primeira parte, apresenta-se o sistema de extrusão utilizado, este sistema foi alvo de uma otimização no extrusor para que pudesse cumprir os requisitos necessários para impressão. Essa otimização será devidamente explicada, assim como a função de cada componente do sistema.

O passo seguinte consistiu no estudo da composição da argamassa, da qual surgiram 3 tipologias diferentes, uma sem e duas com a inclusão de fibras metálicas. Serão evidenciados todos os requisitos necessários para uma boa impressão.

As argamassas foram caracterizadas durante as primeiras idades, avaliando a sua perda de fluidez ao longo do tempo. Para avaliar o impacto da impressão 3D, na perda de resistência mecânica, foram ensaiados aos 28 dias, provetes moldados e impressos, e feita a devida comparação.

Por último, foi selecionada a argamassa ótima para impressão tendo por base os ensaios realizados. Na figura 3.1 está representado todo o processo realizado no caso de estudo.

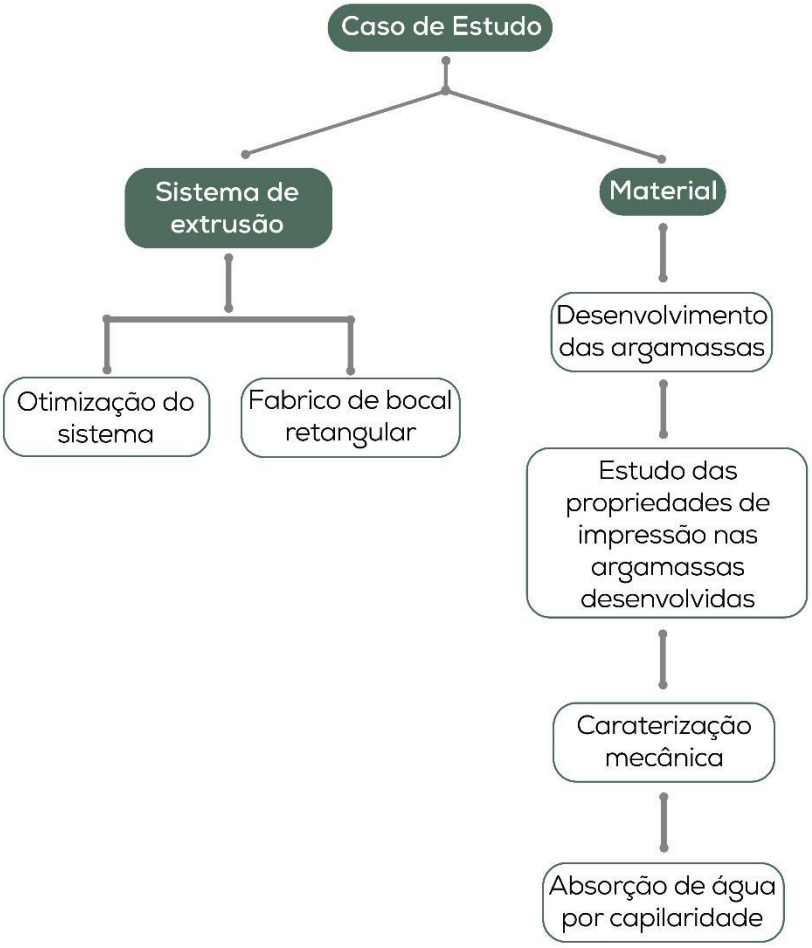


Figura 3.1 – Organograma representativo do trabalho experimental.

3.1. Sistema de Extrusão

No presente trabalho por falta de orçamento para idealização de um sistema de impressão, foi utilizado um extrusor com um funcionamento semelhante ao de uma seringa, anteriormente utilizado no projeto ADIMAQ - "Fabrico ADItivo por extrusão e MAQuinagem para produção híbrida de modelos, moldes e moldações de grandes dimensões", P2020 em Co-Promoção com CEI, Ferespe e INEGI, outubro de 2015 a outubro de 2018. Este sistema transforma a força de um motor no deslocamento de um pistão, no interior de um tubo em aço inoxidável. Nesse tubo, é vertido o material, que, posteriormente, é acoplado à estrutura do sistema. A pressão do pistão faz com que o material seja extrudido, sobre a mesa de impressão. A mesa é de controlo manual, os movimentos são limitados aos eixos x e y, privilegiando o uso de formas ortogonais.

Todos os componentes do sistema de extrusão estão representados na figura 3.2 e na tabela 3.1.

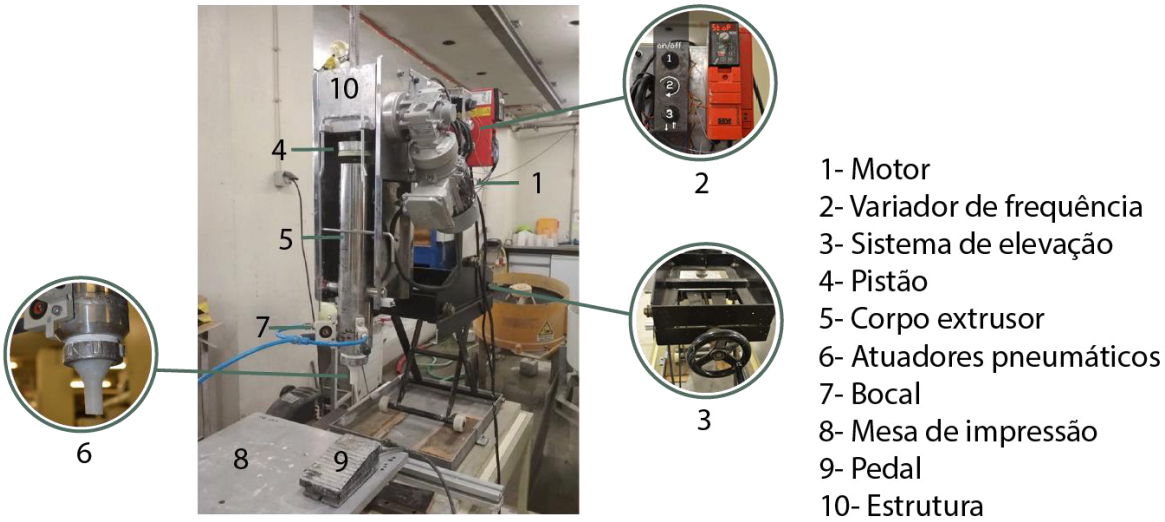


Figura 3.2 – Componentes do sistema de extrusão.

Na tabela seguinte estão representados os componentes principais do mecanismo assim como a sua função durante o processo de impressão.

Tabela 3.1 – Componentes e respetiva função, do sistema de extrusão.

COMPONENTE	FUNÇÃO
MOTOR	Componente responsável pela pressão que o pistão exerce sobre o material.
VARIADOR DE FREQUÊNCIA	Controla a velocidade do motor assim como os seus movimentos. Na figura 3.2 são visíveis 3 interruptores no variador de frequência, o primeiro interruptor (1) liga e desliga a alimentação do motor; o segundo (2) é um controlador de intensidade, que aumenta ou diminui a velocidade do motor; o (3) coordena os movimentos ascendentes e descendentes do pistão.
SISTEMA DE ELEVAÇÃO	Sistema semelhante a um macaco mecânico, que transmite o movimento de uma manivela em um movimento linear, que garante a elevação do sistema.
PISTÃO	O pistão é o elemento responsável pela extrusão do material, é composto por um veio em aço, cabeça em alumínio e um vedante em borracha que se ajusta perfeitamente ao corpo da seringa, garantindo que a pressão é exercida na totalidade do material.
CORPO EXTRUSOR	Componente que armazena a argamassa depois da amassadura sendo o único caminho que o material percorre, até à extrusão.
ATUADORES PNEUMÁTICOS	Têm por função aplicar alguma vibração ao material junto à saída do extrusor,
BOCAL	Componente que deposita o material sobre a mesa de impressão. A sua forma tem influência no acabamento do filamento. Neste trabalho foram utilizados 4 bocais distintos: 3 de secção transversal circular (15, 23 e 40 mm de diâmetro) e um de secção transversal retangular com 35x15 mm^2.
MESA DE IMPRESSÃO	Com uma área de impressão útil de 0,113 m^2 a mesa de impressão desliza sobre dois carris que garantem movimentos nos eixos x e y. Sobre a mesa foi colocada uma placa de MDF, com grelha para facilitar a medição dos provetes durante a impressão e plastificada para facilitar a sua limpeza (Figura 3.3).
PEDAL	Controla o movimento descendente do pistão.
ESTRUTURA	Suporta todos os componentes necessários para impressão.
COMPRESSOR	Componente auxiliar, que aciona e regula a vibração aplicada pelos atuadores pneumáticos.

Figura 3.3 - Mesa de impressão utilizada durante o presente trabalho.

3.1.1. Otimização do Extrusor

Inicialmente o sistema era composto por um extrusor com 135 mm de diâmetro, no entanto, aquando dos primeiros ensaios, houve dificuldade em extrudir o material. Os filamentos só eram extrudidos numa fase de elevada fluidez e pouca consistência. A incapacidade de extrusão do material com consistência mais elevada permitiu concluir que a pressão exercida pelo pistão era insuficiente.

Um problema semelhante foi encontrado no projeto de Rudenko (2014b), no entanto a sua solução passou pela otimização do material, uma proposta seguida neste projeto mas que não foi suficiente. Outra reformulação possível passaria pela alteração do sistema, a melhor opção seria o fabrico de um extrusor cónico com um parafuso de Arquimedes, referenciado: na impressora Delta Big Wasp 66 (WASP 2017a); no artigo de Ma, Li e Wang (2018); e na tese de Mestrado de Annel (2015). Uma solução que contribuiria com a introdução de energia no material, devido à rotação do parafuso, recuperando, assim, a perda de trabalhabilidade devido à tixotropia do material. Apesar de ser o processo mais recomendado na literatura, o fabrico de um extrusor com parafuso de

Arquimedes iria prolongar-se para além do prazo estipulado para a conclusão deste trabalho.

A solução encontrada passou pelo fabrico de um extrusor de menor diâmetro, ou seja, mantendo a força aplicada, se a área for reduzida consegue-se um aumento de pressão, logo uma maior capacidade de extrusão.

Para além do aumento de pressão foram introduzidos dois atuadores pneumáticos, que vibram o material junto ao bocal da seringa (Figura 3.4). A aplicação de vibração destina-se a melhorar a trabalhabilidade do material, afetada pelo repouso do material no extrusor, devido à tixotropia da mistura.

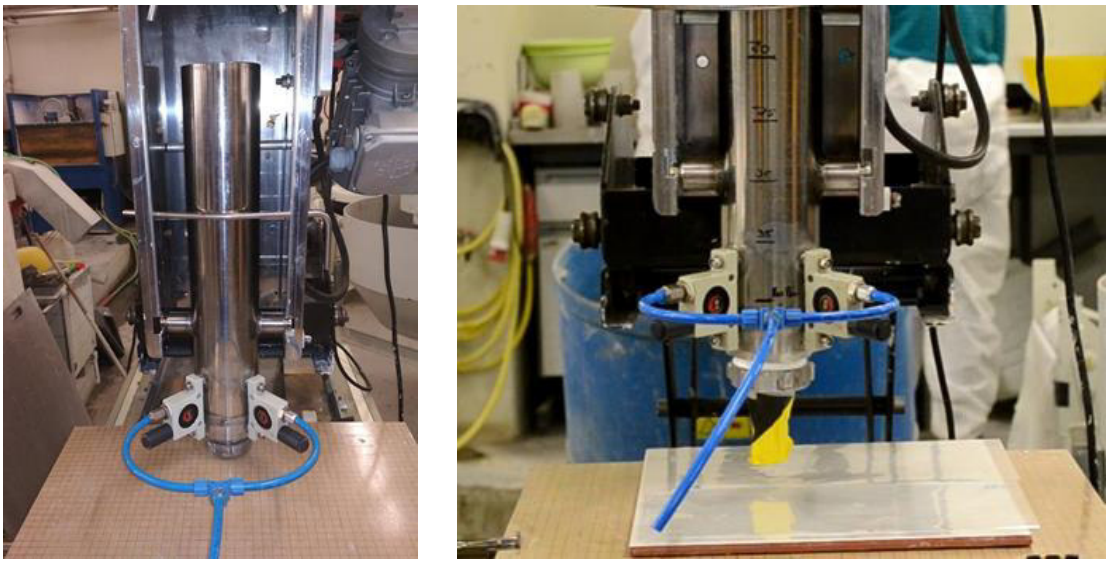


Figura 3.4 – Pormenor dos atuadores pneumáticos no extrusor fabricado, devidamente acoplado ao sistema de extrusão.

O diâmetro do corpo do extrusor foi então reduzido, dos anteriores 135 para os 85 mm de diâmetro, aumentando a pressão em cerca de 2,5 vezes. Para o fabrico deste novo extrusor atenderam-se às seguintes condicionantes: os apoios teriam de ter as mesmas dimensões que os anteriores; a dimensão da rosca de acoplamento do bocal teria também de respeitar os mesmos 55 mm de diâmetro; promover a reutilização do máximo de componentes possíveis. Na figura 3.5 está presente uma vista explodida do extrusor onde são visíveis todos os componentes fabricados, com exceção do veio e da rosca que foram

aproveitados do extrusor antigo (Anexo A). Na figura 3.6 estão representadas as alterações realizadas.

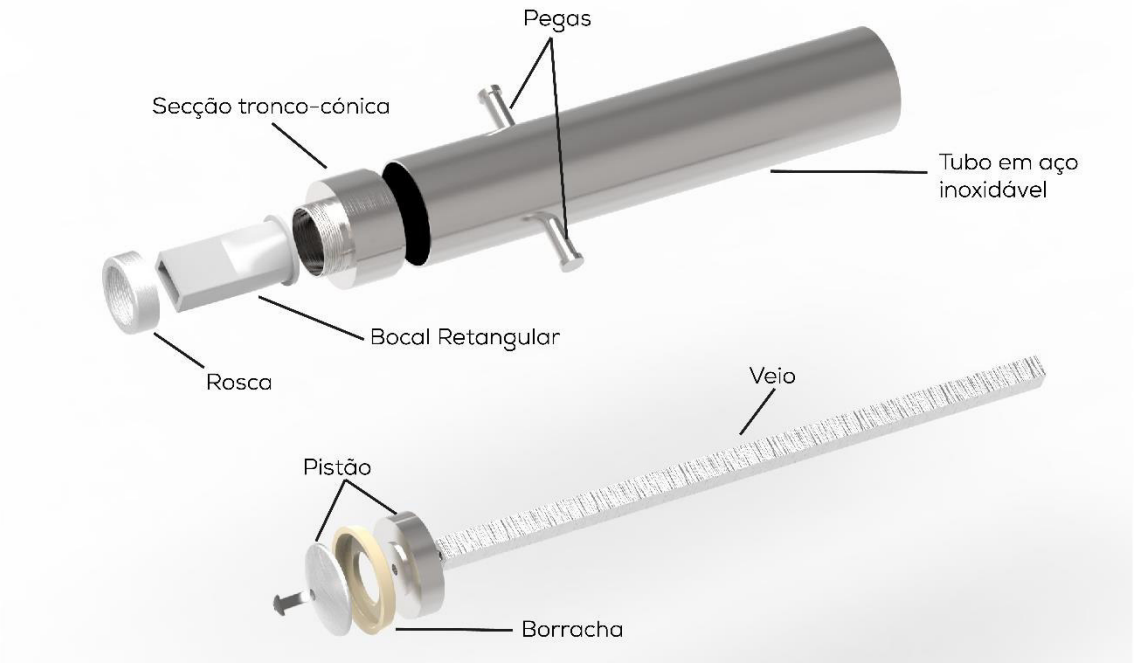


Figura 3.5 – Vista explodida com componentes do novo extrusor.

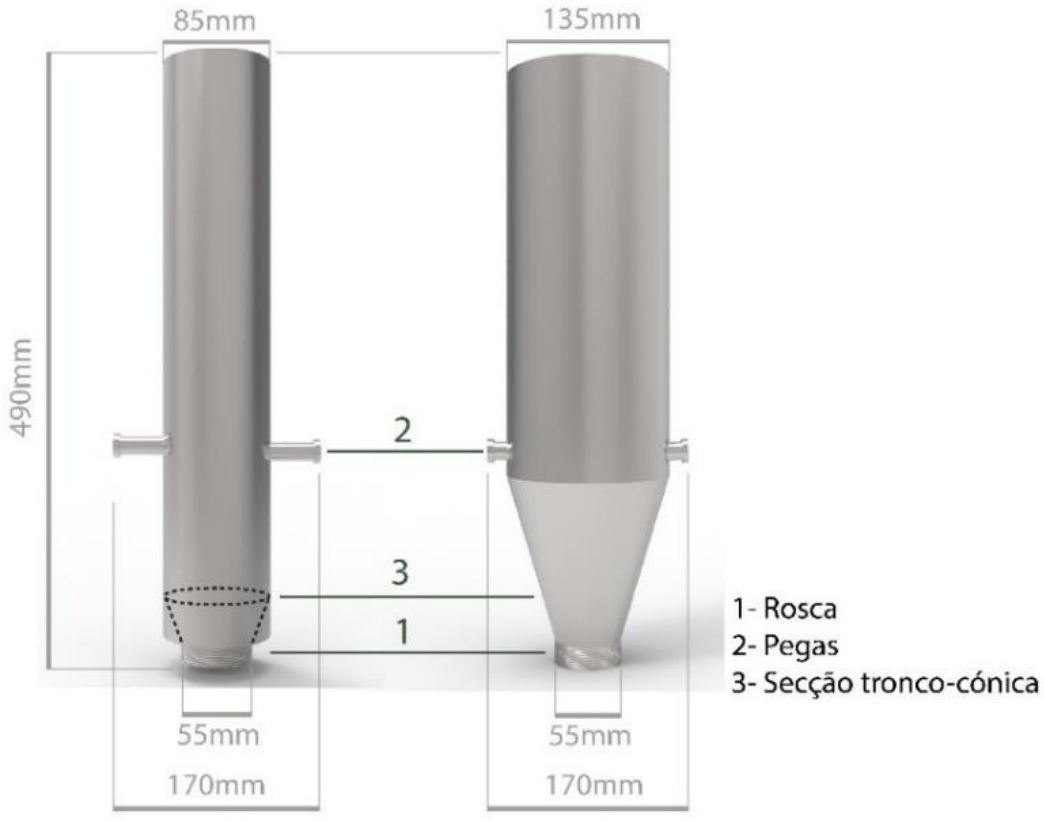


Figura 3.6 – Alterações na otimização do extrusor fabricado e existente, respetivamente.

A secção tronco-cónica foi reduzida com o intuito de diminuir o desperdício de material, sendo que o início desta secção determina o alcance máximo do pistão que se traduz na capacidade máxima de extrusão (Figura 3.7). Esta alteração reduziu o desperdício de material em 88,6%.

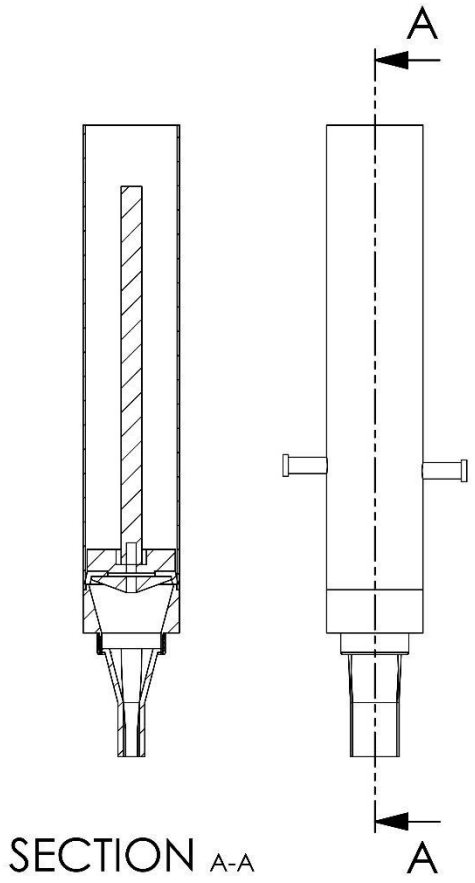


Figura 3.7 – Corte longitudinal do extrusor otimizado.

3.1.2. Limitações

Alguns problemas foram solucionados com a otimização do extrusor, no entanto, nem todos foram resolvidos. Na Tabela 3.2, estão representadas algumas limitações do sistema com impacto direto no processo de impressão.

Tabela 3.2 - Limitações do mecanismo de impressão.

CONTROLO E LIBERDADE DOS MOVIMENTOS	Acabamentos irregulares, devido ao controlo manual da mesa de impressão.
VOLUME DE IMPRESSÃO	Volume de impressão limitado às dimensões de 250x450x110 mm^3.
SAÍDA DE MATERIAL	Inicialmente é necessário bloquear manualmente a saída do extrusor, caso contrário a argamassa cai por gravidade (Figura 3.9).
PESSOAL NECESSÁRIO	Para que o processo de impressão seja realizado, sem problemas, são necessários 3 operadores (Figura 3.8).
CAPACIDADE	A capacidade do extrusor é limitada a aproximadamente 5kg de material. Para o seu abastecimento é necessário subir o pistão até ao topo e retirar o extrusor do sistema de impressão.
PRESSÃO INSUFICIENTE	Embora com maior pressão, quando o material atinge um certo nível de consistência o sistema é incapaz do extrudir.
PERDA DE MATERIAL	Como a parte final da extrusor forma uma secção tronco-cónica, torna se impossível extrudir o material presente na parte da secção troco-cónica,

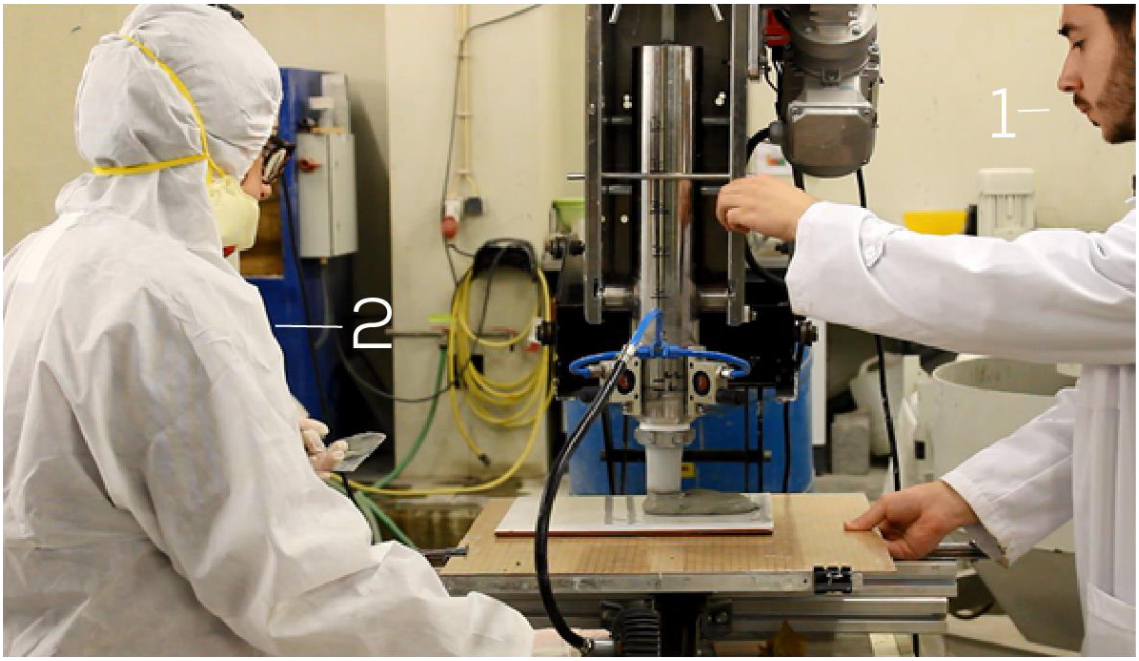


Figura 3.8 – Operadores necessários durante o processo de impressão. O operador 1 é responsável pelo controlo do pistão e pelos movimentos da mesa de impressão, o operador 2 pelo controlo da vibração e pela abertura e fecho do bocal, e o operador 3, que não se encontra na imagem, é responsável pela troca de azulejos com os filamentos impressos por azulejos vazios, assim como o registo dos tempos de impressão.

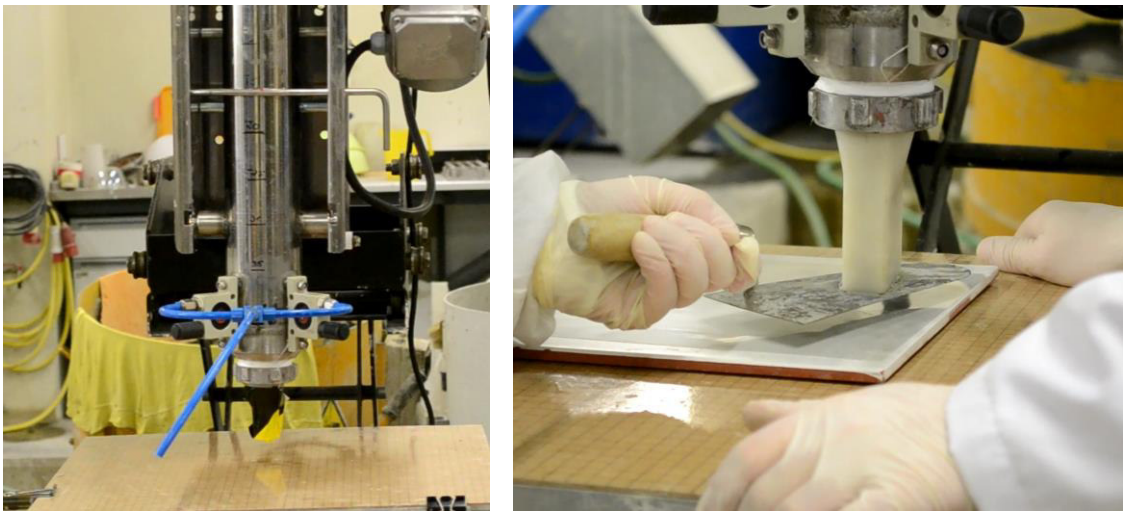


Figura 3.9 - Bloqueio inicial do bocal com fita-cola, seguido do bloqueio manual com uma colher, momentos antes da impressão.

3.2. Material

3.2.1. Requisitos de Desempenho para a Impressão

Para além da grande durabilidade, os betões e as argamassas são materiais com uma consistência no estado fresco que permite que estes sejam moldados, adaptando-se a qualquer forma, podendo igualmente adaptar-se para o uso em sistemas de impressão tridimensional (Bos et al., 2016). Contudo a argamassa deve ser ajustada às características do sistema de impressão a usar. O material deve: possuir a fluidez necessária para não comprometer o seu transporte ao longo do processo de impressão; aquando da impressão deverá apresentar uma consistência próxima de abaixamento zero; e após a impressão deve desenvolver resistência suficientemente rápido para conseguir suportar o peso das camadas sucessivas, sem deformação excessiva, e não comprometendo a adesão entre camadas (Weng et al. 2018; Malaeb et al. 2015; Perrot, Rangeard, e Pierre 2016).

Os requisitos habitualmente associados à "printability", desempenho para a impressão, do material são: "workability", "extrudability", "buildability" (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Requisitos habitualmente associados ao desempenho para impressão.

"WORKABILITY"	Refere-se à trabalhabilidade do material após o fim da amassadura, sendo a propriedade que afeta diretamente o seu transporte ao longo de todo o processo de impressão. Esta propriedade varia ao longo do tempo e é afetada por fatores ambientais como temperatura e humidade.	"PRINTABILITY"
"EXTRUDABILITY"	Este requisito relaciona-se com as características que asseguram a deposição em filamentos contínuos e estáveis, através de um bocal. Materiais com má "extrudability" originam bloqueios no sistema ou interrupções no filamento.	
"BUILDABILITY"	Refere-se ao desenvolvimento da microestrutura do material e ganho de resistência ao longo das primeiras idades, que assegura o empilhamento sucessivo de camadas sem deformação excessiva. Quanto melhor "buildability" tiver o material, menor será o risco de construções mais altas colapsarem.	

Alguns destes requisitos são contraditórios e afetados por fatores ambientais (temperatura, humidade) e variam ao longo do tempo, podendo ser difícil conseguir o balanço ótimo entre as diferentes propriedades do material necessárias para a impressão com materiais cimentícios.

3.2.2. Fatores que Influenciam a Impressão

Durante um processo de impressão 3D com material cimentício existem vários parâmetros que influenciam a qualidade de impressão, sendo eles a geometria da peça, as propriedades do material e as configurações da impressão, representados esquematicamente na figura 3.10.

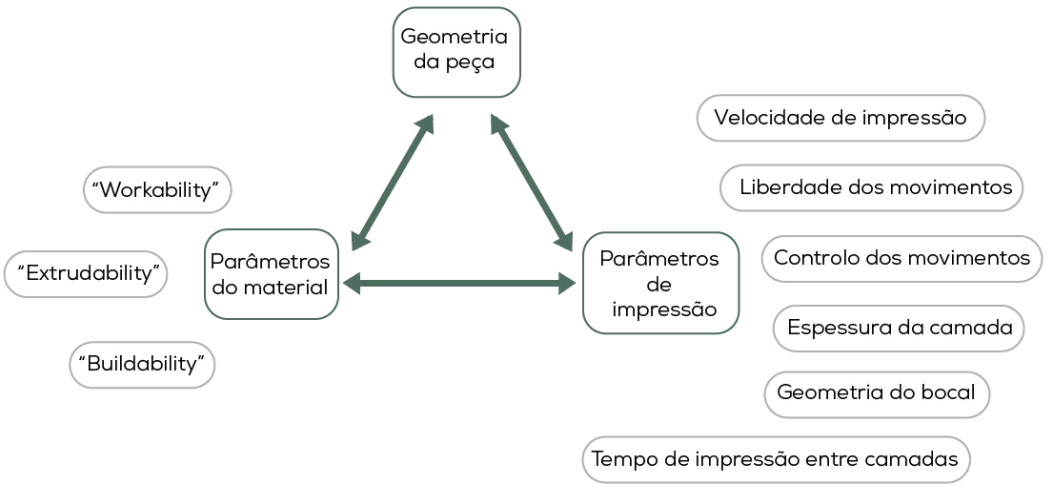


Figura 3.10 – Fatores que influenciam a qualidade da impressão, adaptado de Ma, Li, e Wang (2018).

O sistema de impressão utilizado neste trabalho proporciona a extrusão do material e a sua deposição em camadas, no entanto, não permite controlar com rigor vários fatores determinantes para a qualidade da peça.

3.2.2.1. Composição das Argamassas para Impressão

A composição utilizada neste trabalho partiu das composições apresentadas durante o capítulo anterior, assim como da composição de um material cimentício de elevado desempenho e com elevada trabalhabilidade (auto-compactável). Um betão auto-compactável (SCC), é um material com uma relação água / finos baixa, mas que apresenta elevada fluidez, no seu estado fresco, capaz de diminuir a quantidade de ar na sua composição, sem auxílio de um sistema de vibração, o que aumenta a sua durabilidade (R. Gagne e Aitcin). O adjuvante superplastificante é um dos constituintes essenciais para se alcançar a auto-compactabilidade, pois permite, aumentar a trabalhabilidade mesmo com relações água / cimento baixas o que aumenta a resistência no seu estado endurecido, uma vez que a resistência de um betão é inversamente proporcional à relação água / cimento (Ferreira e Jalali 2002).

Os materiais que constituem a base das argamassas aqui estudadas, estão representados na tabela 3.4, juntamente com as devidas proporções (por motivos de confidencialidade não foram divulgadas mais informações).

Tabela 3.4 – Proporções relativas na composição da argamassa.

Argamassa	A
Cimento (CEM I 42.5 R)	23,6%
Fíler Calcário	13,5%
Metacaulino	7,8%
Areia Fina	44%
Água	10,4 %
Superplastificante	0,7%

Neste trabalho foram estudadas 3 argamassas. A argamassa A é a indicada na tabela 3.5. As argamassas B e C, têm a mesma composição, no entanto foram incluídos 2% de fibras metálicas (Tabela 3.5 e Figura 3.11) com 6 mm e 13 mm de comprimento, respetivamente.

Tabela 3.5 – Características das fibras metálicas, utilizadas nas argamassas B e C.

	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Peso específico (kg/m^3)	Resistência à tração (MPa)
Krampharex	6	0,175	7850	2100
Dramix	13	0,2	7850	2750

A- **Fíler Calcário**, material obtido através da moagem fina do calcário.

B- **Metacaulino,** é um material com alto teor de sílica, pozolânico, obtido através da calcinação de argilas ricas em caulinite, entre os 600° e 900 ° C (Silva 2013).

C- **Areia,** principal agregado na composição da argamassa. Ao longo de todo o trabalho foi utilizada uma areia com dimensão máxima inferior a 2 mm.

D- **Cimento (CEM I 42.5 R),** um material que através de uma reação química com a água hidrata e endurece (Cimpor 2017a).

E- **Superplastificante,** material que permite reduzir a quantidade de água necessária para alcançar uma dada trabalhabilidade.

F- **Fibras metálicas,** melhoram o comportamento mecânico da argamassa, em particular o seu comportamento à tração/flexão.

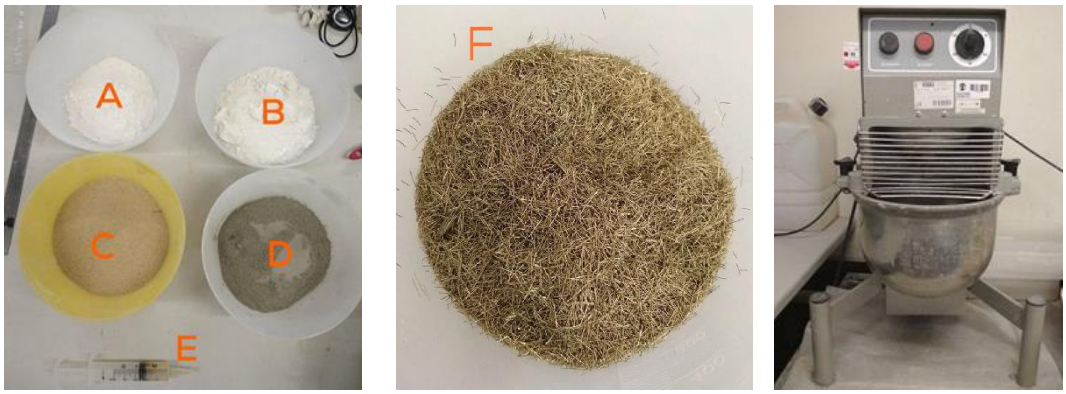


Figura 3.11 - Materiais constituintes das argamassas projetadas e misturadora para argamassas com capacidade para 10l, modelo 16-B 0072 da marca Constrols.

Após a pesagem de cada componente da mistura, iniciou-se o processo de amassadura da argamassa, na misturadora da imagem anterior, de acordo com o procedimento ilustrado na figura 3.12. No último passo, não tendo a argamassa fibras, foi retirado o material aderente das paredes e da pá, e misturado normalmente durante um minuto.

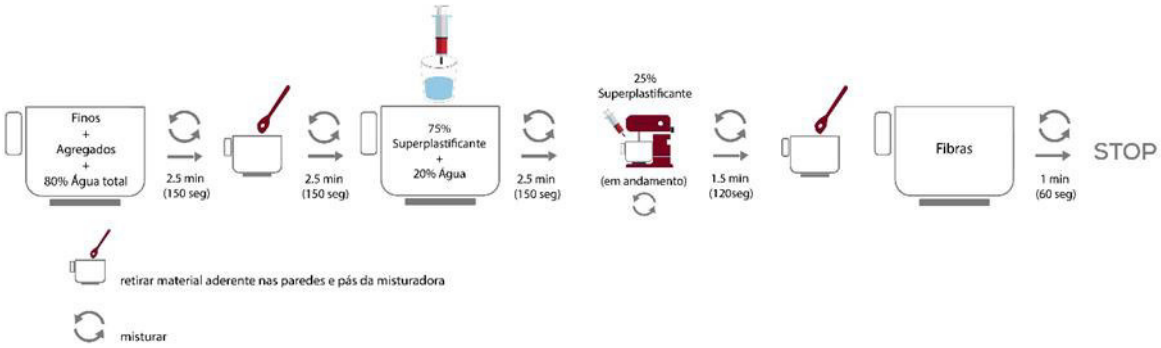


Figura 3.12 - Processo de amassadura da argamassa.

3.2.2.2. Testes de Impressão Manual

Tendo em vista ajustar a consistência da argamassa aos requisitos ligados com o processo de impressão, foram realizados alguns testes básicos com seringas de pastelaria. Como a superfície de impressão tem impacto na deformação da primeira camada, serão utilizados acetatos como superfície de impressão, em todos os ensaios deste trabalho. O acetato foi escolhido por apresentar índices de atrito baixos, que privilegia o espalhamento da argamassa, assim os resultados seriam obtidos com base num pior cenário.

As seringas possuem capacidade para 100 ml de material, e um bocal com 20 mm de diâmetro.

O teste resultou na impressão de 3 exemplares, o primeiro está representado na figura 3.13 e foi impresso aos 10 minutos (após amassadura), os seguintes representados nas figuras 3.14 e 3.15, foram impressos aos 12 e os 15 minutos, respetivamente. O exemplar 3 é o que melhor resultado apresenta, onde as camadas estão bem definidas e com bom acabamento, ou seja, visualmente, pode ser considerado o período ótimo de impressão (15 minutos). Este período resulta no espaço de tempo onde as propriedades de impressão se encontram equilibradas, ou seja, temos a trabalhabilidade necessária para efetuar a extrusão e a consistência necessária para suportar camadas sucessivas. Este período, normalmente, é considerado, a partir do momento em que o material consegue suportar a camada superior sem grandes afastamentos até ao momento em que é extrudido com interrupções no filamento ou com dificuldade pelo sistema de extrusão (Ma, Li, e Wang 2018). O fim do ensaio é dado aos 18 minutos, quando não é possível extrudir o material da seringa manualmente.

Figura 3.13 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 1.

Figura 3.14 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 2.

Figura 3.15 – Testes de impressão com seringa de pastelaria, exemplar 3.

3.2.3. Evolução das Propriedades da Argamassa ao Longo do Tempo

Para determinar o período em que o material atinge as propriedades ótimas para impressão, "Printability", foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de espalhamento e impressão de filamentos ao longo do tempo, à semelhança do trabalho de Ma, Li, e Wang (Ma, Li, e Wang 2018). Em todos os ensaios foi utilizado o mesmo tipo de base, um acetato sobre um azulejo. O azulejo foi utilizado para facilitar a troca da superfície de impressão, funcionando como suporte do acetato.

Todos os ensaios foram gravados em vídeo para que mais tarde pudessem ser descobertos erros ou falhas durante o processo.

3.2.3.1. Ensaio de Espalhamento

O ensaio de espalhamento consiste no enchimento de um molde troncocónico, com argamassa, semelhante ao molde da figura 3.16. Após o enchimento do molde, este é levantado perpendicularmente à mesa na qual está assente, o material será então libertado, deformando-se na superfície da mesa. Quando o movimento pára são medidos perpendicularmente dois diâmetros, com uma régua metálica, da área de espalhamento formada. A média destes dois diâmetros resulta no índice de deformabilidade da argamassa.

Figura 3.16 – Molde metálico tronco-cónico utilizado no ensaio de espalhamento.

Os ensaios de espalhamento foram realizados desde o minuto 3 até ao minuto 25, após o final da amassadura. O intervalo de tempo não foi previamente

estipulado, ou seja, o tempo entre cada ensaio resulta do tempo de enchimento, limpeza da mesa, enchimento do molde e execução do ensaio.

Na curva da figura 3.17 estão representados os diâmetros de espalhamento da argamassa A ao longo do tempo. A diminuição do diâmetro está diretamente relacionada com a perda de fluidez do material. Podemos observar que existe um ligeiro aumento do diâmetro do espalhamento do 1º para o 2º ensaio, que pode ser justificado com o facto de o efeito do superplastificante se prolongar ainda ao longo dos primeiros minutos após o fim da amassadura.

Os resultados obtidos levam a concluir que existe uma perda de fluidez ao longo do tempo, sendo que o material deixa de ser capaz de se deformar sem a ajuda de energia externa ao fim de cerca de 25 min.

Os valores apresentados com □ e Δ, correspondem aos resultados dos ensaios de espalhamento realizados, aos 3 minutos, com as argamassas B e C, respetivamente. A perda de fluidez foi de 4% na argamassa B e de 41% na argamassa C, comprovando que a inclusão de fibras e o seu comprimento têm influência na redução da trabalhabilidade da argamassa. Na figura 3.18 está representado a imagem do primeiro e último ensaio de espalhamento, com a argamassa A.

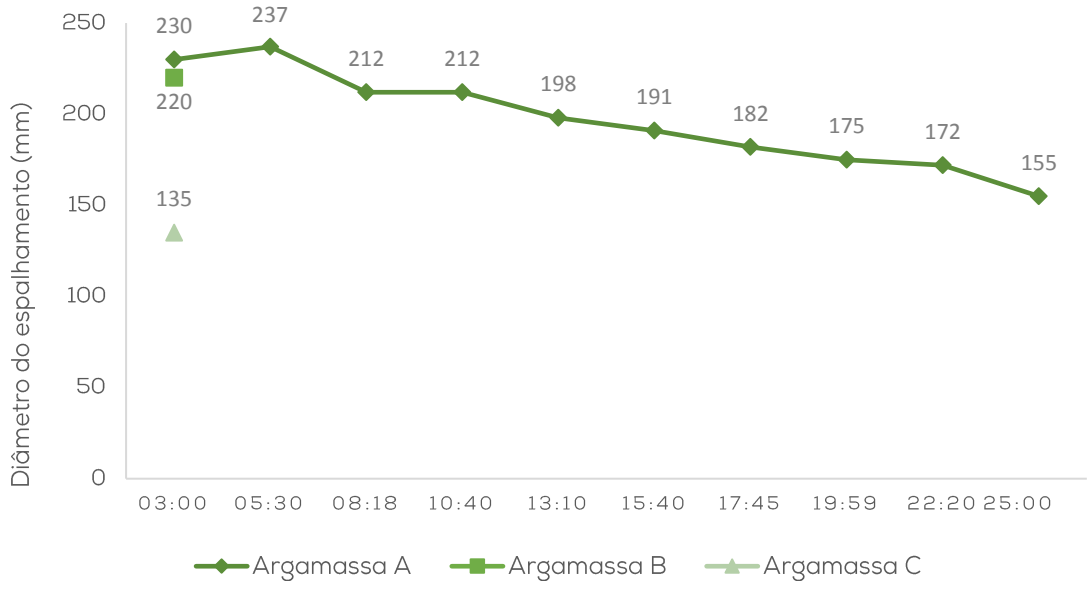


Figura 3.17– Resultados dos ensaios de espalhamento.

Figura 3.18 – Ensaio aos 3:00 e aos 25:00 minutos, respetivamente.

3.2.3.2. Filamentos Impressos ao Longo do Tempo

Para a realização dos ensaios com a impressão de filamentos ao longo do tempo, foram utilizados dois tipos de bocais e dois tipos de argamassa, uma sem fibras e outra com fibras metálicas de 6 mm. A altura do bocal face à superfície de impressão foi definida com base na regra de que deve ser igual ou inferior à abertura do bocal, ou seja h ≤ a (Figura 3.19), promovendo a compactação das camadas que melhora a sua ligação (Bos et al. 2016; Ma, Li, e Wang 2018).

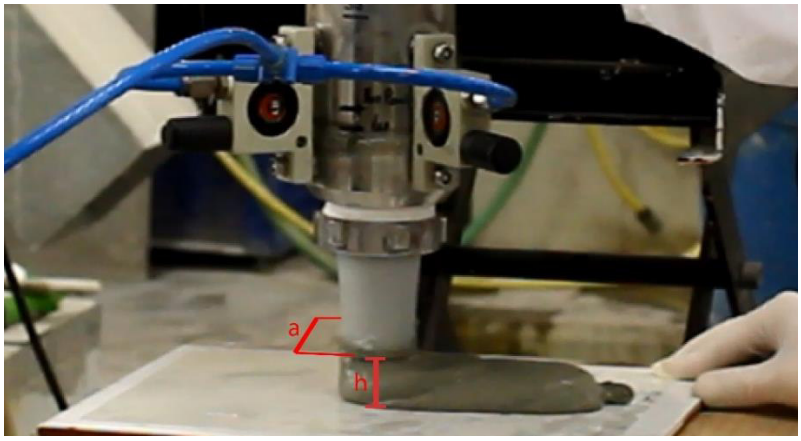


Figura 3.19 – Largura do bocal (a) e altura face à mesa de impressão (h).

Os resultados obtidos nos próximos ensaios têm como referência a média da largura dos filamentos, obtida com base em 3 larguras de cada filamento, medidas como demonstrado na figura 3.20. Foi medido no início onde existiram larguras inferiores em todos os provetes (L1), no meio por ter sido o local onde a largura do filamento foi mais constante (L2), e no final por ser o local onde na

maioria das vezes se registaram maiores larguras, devido à dificuldade em bloquear a saída de material pelo bocal (L3). A medição de todos os filamentos pode ser consultada no Anexo B.

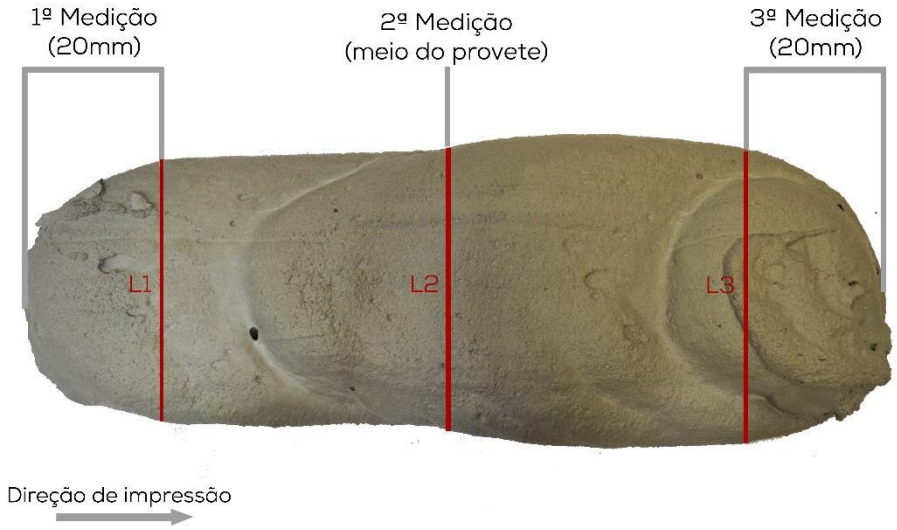


Figura 3.20 – Esquema de medição para a média da largura dos filamentos.

Num 1º ensaio foi utilizado um bocal com o diâmetro de 43 mm (a) a 30 mm de altura (h), e um paquímetro para medição da largura dos filamentos. A maioria dos filamentos apresenta um aumento da largura na direção de impressão (Figura 3.21 e 3.22), devido ao ganho de consistência da argamassa ser maior no bocal, pois quando este é interrompido a hidratação do cimento é mais rápida à saída, o que atrasa a extrusão num momento inicial. Após esta primeira porção de material ser extrudida, o material que se encontra no interior, com maior fluidez, é posteriormente extrudido o que resulta num maior alargamento na fase final. Outro fator é o facto de ser necessário fechar o bocal manualmente, o que atrasa o processo, e que por vezes resulta numa maior deposição de material na parte final. A maioria das irregularidades nos provetes são resultantes da falta de automatização nos movimentos do sistema.

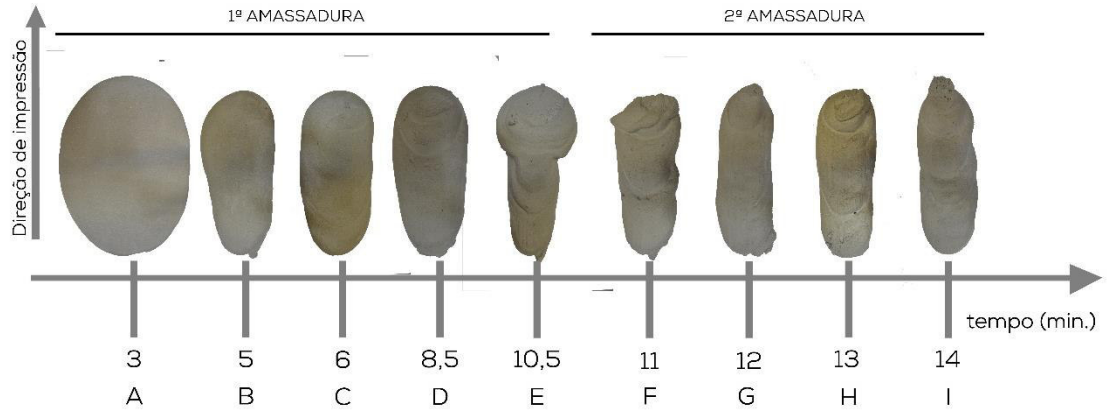


Figura 3.21 – Espalhamentos ao longo do tempo, filamentos impressos com bocal de 43 mm a 30 mm de altura da mesa de impressão.

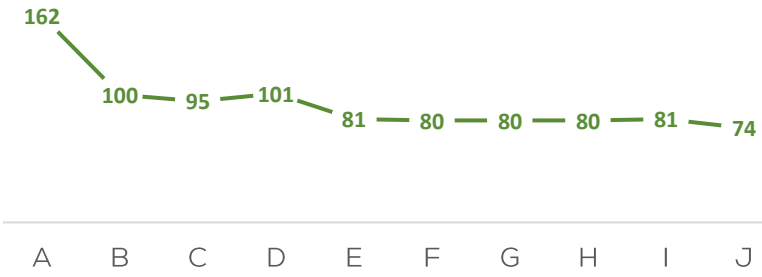


Figura 3.22 – Largura dos filamentos da figura 3.18.

O filamento A, impresso 3 minutos após a amassadura, assemelha-se ao resultado obtido anteriormente no ensaio de espalhamento, com fluidez muito elevada e sem consistência para o empilhamento dos filamentos em camadas. A largura média deste provete é de 162 mm quase 4 vezes maior que a abertura do bocal. Este ensaio foi a primeira tentativa de impressão feita com sucesso, após otimização do sistema, logo as conclusões sobre abatimento dos filamentos não serão as melhores devido a uma enorme conjugação de fatores. Sendo que o facto de o sistema ser manual, faz da experiência um fator com influência na impressão.

Este ensaio permitiu, pela primeira vez, avaliar o comportamento do material com o extrusor e vice-versa, demonstrando que qualquer alteração no material ou no extrusor terá impacto no filamento impresso. Por exemplo, no filamento D houve um aumento do seu espalhamento devido ao aumento da velocidade do pistão (Figura 3.21).

Posteriormente foi feita uma segunda amassadura onde o 1º filamento foi impresso aos 10 minutos, dando continuidade à linha temporal anterior. Desta vez, a velocidade foi mantida até ao final do ensaio. Os movimentos inconstantes da mesa de impressão, influenciam o bom acabamento dos filamentos (Figura 3.23). O último filamento foi impresso numa fase na qual a argamassa começava a cumprir com os requisitos de impressão, no entanto, a quantidade de material só possibilitou a continuidade do ensaio até aos 14 minutos.

Figura 3.23 – Vista lateral do filamento I.

Depois do ensaio anterior, concluímos que o bocal com 40 mm de diâmetro não era o adequado à nossa escala de impressão, o que nos fez alterar para um bocal de 23 mm. A altura do bocal, foi calculada novamente pela mesma regra apresentada anteriormente.

Desta vez o ensaio teve início aos 12 minutos (Figura 3.24), tendo por base os dois ensaios anteriores, que demonstra ser um período onde já não existem grandes espalhamentos, rejeitando assim filamentos com excesso de fluidez. Podemos ainda observar que alguns filamentos continuam com a forma afunilada (A1, A2, A3), no entanto com o decorrer do tempo podemos observar que essa forma vai se transformando em filamentos cada vez mais uniformes e finos, ganhando a consistência que pretendemos para a deposição em camadas.

A curva da figura 3.25, demonstra que a largura média dos filamentos vai diminuindo gradualmente com o passar do tempo, com exceção do filamento A1 para o A2. Este aumento resulta de aos 12 minutos a argamassa, ter sido extrudida apenas pela força da gravidade, enquanto no filamento seguinte foi utilizada a força do pistão, que resultou numa maior quantidade de material extrudida que por consequência aumentou a largura do filamento.

Os intervalos de tempo entre cada filamento são maiores nos primeiros minutos, devido à ainda elevada fluidez da argamassa. A partir do filamento A4 a argamassa começa a atingir as propriedades necessárias para impressão, "printability", tendo filamentos de largura constante e com alguma consistência.

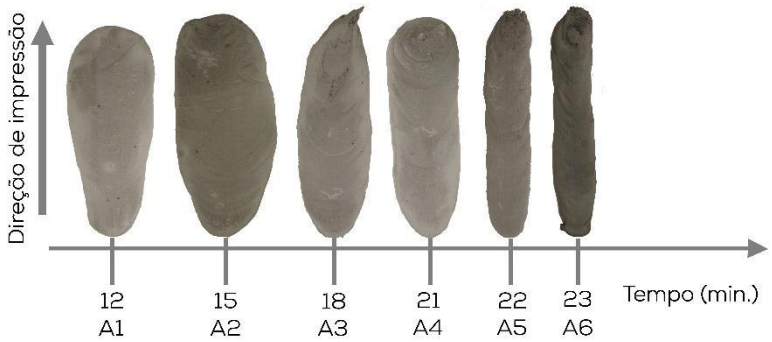


Figura 3.24 – Evolução da largura dos filamentos impressos sem fibras e com bocal de 23 mm a uma altura de 20 mm.

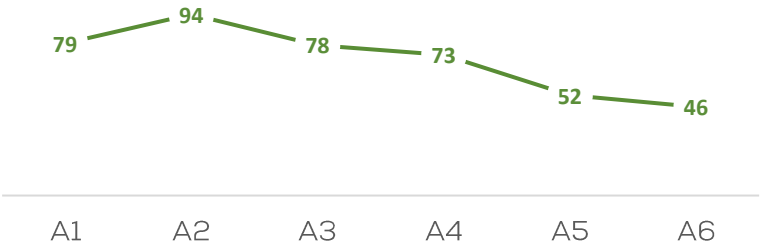


Figura 3.25 – Curva com a largura dos filamentos impressos sem fibras e com bocal de 23 mm.

A figura 3.26, demonstra a primeira impressão de filamentos com fibras de 6mm. Foi novamente utilizado o bocal com 23 mm de diâmetro, a uma altura de 20 mm. A inclusão destas fibras na argamassa resultou na impressão de filamentos com melhor "buildability", esta propriedade traduz-se em filamentos com maior regularidade formal, sem o afunilamento verificado nos casos anteriores e com consistência para o empilhamento de camadas.

Nesta impressão, não foi feito qualquer tipo de alteração na velocidade do pistão, tendo esta ficado estipulada no início do ensaio, com base nas impressões

anteriores. No entanto, do filamento B3 para o filamento B4 houve um aumento considerável de largura, este acontecimento pode ser justificado com o atraso no movimento da mesa em relação aos outros filamentos, verificado no vídeo do ensaio.

O fim do ensaio surge com a incapacidade do sistema extrudir o material, figuras 3.26 e 3.27, filamento B9. Acontece aos 18 minutos, mais cedo do que no ensaio anterior, pois a trabalhabilidade da argamassa diminui com a inclusão de fibras, fazendo com que o sistema atinja o limite mais cedo.

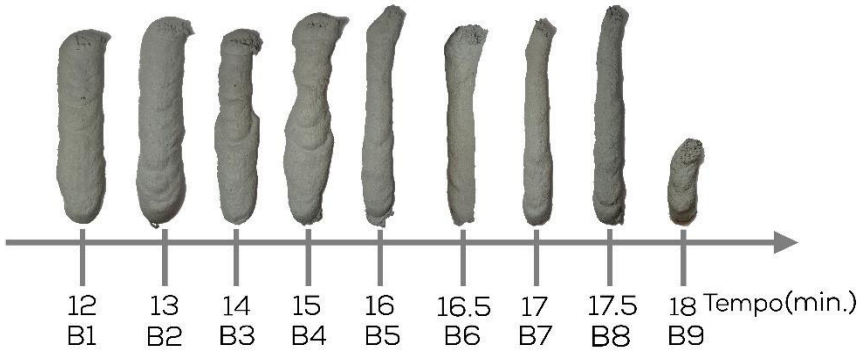


Figura 3.26 – Filamentos impressos ao longo do tempo, impressos com bocal de 23 mm e com fibras metálicas de 6 mm.

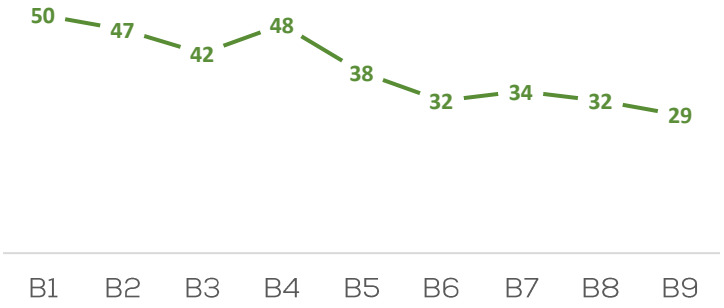


Figura 3.27 – Curva com largura dos filamentos impressos com fibras de 6mm, com o bocal de 23 mm à altura de 20 mm.

Da análise dos últimos dois ensaios (Figura 3.28), concluímos que a argamassa B, com 2% de fibras de 6mm, tem menor fluidez que a argamassa A, no mesmo período. Isto é claramente visível no provete A1, que apresenta uma

deformação maior que o provete B1. É necessário recorrer aos provetes A5 e A6, impressos aos 22 e 23 minutos, respetivamente, para obter resultados semelhantes aos provetes B1 e B2.

Em conclusão a inclusão de fibras aumenta a "buildability" do material, sendo apenas necessários 12 minutos de espera, após amassadura, para iniciar a impressão com filamentos consistentes e uniformes.

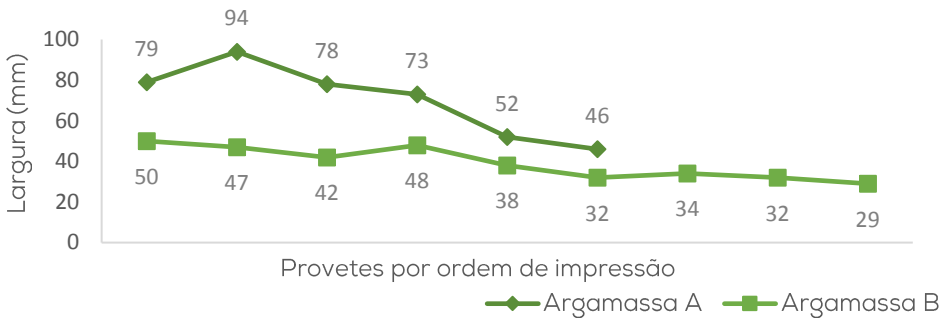


Figura 3.28 – Resultados dos ensaios da Figura 3.17 e 3.19.

3.3. Ensaios Mecânicos

Para caracterização mecânica das argamassas foram realizados dois tipos de ensaios um à compressão e outro à flexão. Estes dois ensaios foram conduzidos segundo a norma NP EN 196-1:2005, com controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 0.01 mm/s e 0.02 mm/s, à flexão e compressão, respetivamente. O equipamento utilizado foi uma prensa universal Instron 300 DX, com capacidade máxima de 300kN (Figura 3.29). Cada ensaio foi realizado com 2 tipos de provetes: uns moldados, com as dimensões referidas na figura 3.30, e outros obtidos através da impressão. Através da comparação destes dois tipos de provetes, será possível caracterizar os efeitos da impressão 3D nas propriedades mecânicas.

Figura 3.29 – Prensa universal Instron 300 DX em ensaio de compressão,

Todos os provetes, moldados e impressos, foram colocados em água e submetidos, a um período de cura de 28 dias, em ambiente saturado, com temperatura controlada a 20 °C.

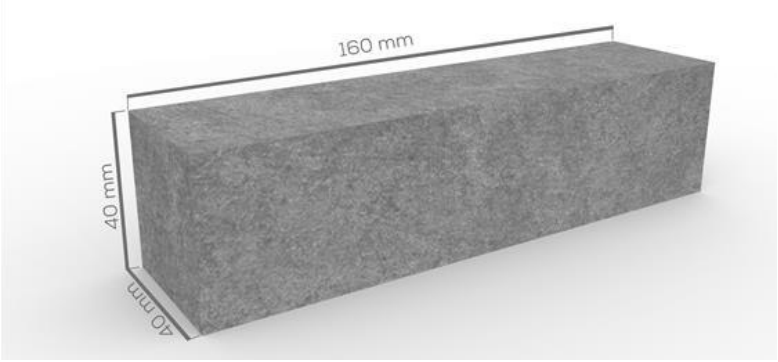


Figura 3.30 – Medidas provetes de referência, moldados.

3.3.1. Impressão e Preparação dos Provetes

Para a impressão dos provetes foi fabricado um novo bocal de secção transversal retangular, com 35x15 mm^2 (Figura 3.31), que proporciona melhor acabamento lateral, como o demonstrado durante o estado de arte em BetAbram (2016b) ou Ma, Li, e Wang (2018). As medidas deste novo bocal foram pensadas de acordo com as medidas pretendidas para os provetes, 40x40x160 mm^3, assim como o diâmetro da rosca do extrusor.

Figura 3.31 – Modelação 3D e fotografias do bocal retangular, impresso, utilizado na impressão dos provetes, respetivamente.

Foram impressos no total 6 provetes, 2 de cada tipo de argamassa. O número de provetes impressos foi condicionado pelo sistema de impressão, que só possibilita a impressão de 2 provetes por amassadura, tornando a impressão de mais provetes, morosa, e fora do prazo estipulado. Durante a impressão praticamente não houve tempo de espera entre a deposição do material das diferentes camadas, contribuindo para uma boa adesão entre camadas. A altura do bocal face à superfície de deposição foi de 15 mm. A impressão dos provetes comprovou que a impressão com um bocal de secção transversal retangular proporciona, melhores acabamentos que um bocal de secção transversal redonda (Figura 3.32).

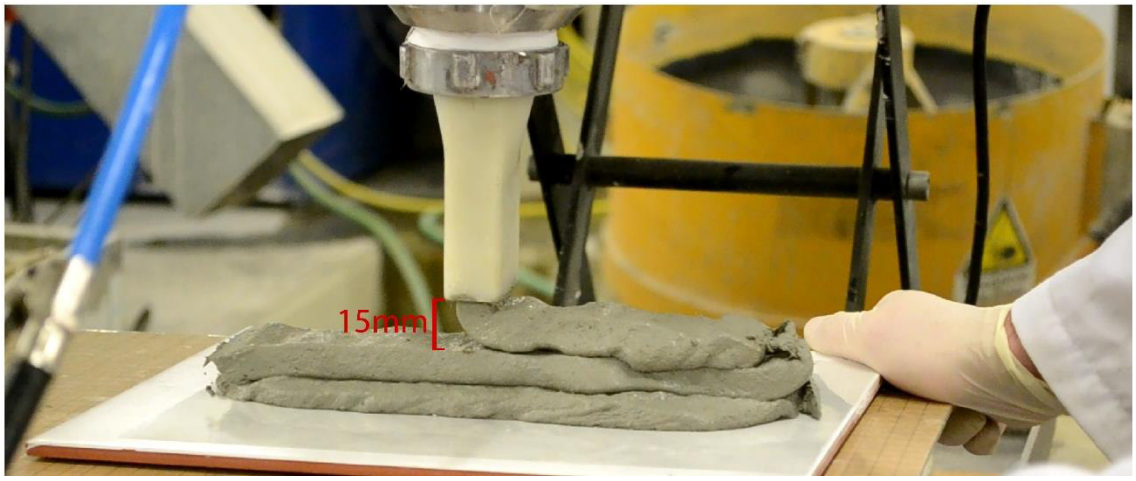


Figura 3.32 – Impressão dos provetes para ensaio mecânico.

As faces laterais dos provetes impressos foram cortadas, para que estes pudessem ser ensaiados. Nas figuras 3.33 e 3.34 estão representados os provetes antes e depois do corte, respetivamente. Os provetes foram cortados numa serra de diamante RUBI DS-300 de 2200W, com um disco de 300 mm de diâmetro. Alguns provetes por não terem o tamanho suficiente para igualar as medidas dos provetes moldados, foram cortados de maneira a aproveitar o máximo de material, resultando em alturas e larguras diferentes em todos os provetes. No entanto, o comprimento dos provetes foi comum em todos, igualando os 160 mm dos provetes moldados. As restantes medidas serão apresentadas nas mesmas tabelas que os resultados dos ensaios mecânicos (Tabela 3.6 e 3.7).

Figura 3.33 – Provete impresso para ensaios mecânicos, com fibras de 6mm.

Figura 3.34 – Provete impresso para ensaios mecânicos, com fibras de 6mm, depois do corte das laterais.

Para ensaios mecânicos de provetes impressos, existem 3 posições de ensaio, mencionadas em Doomen (2016). No presente trabalho, a aplicação da carga foi efetuada na direção paralela ao plano de interface entre camadas, por se julgar ser este o pior cenário em termos de solicitação.

3.3.2. Ensaio à Flexão

Na tabela 3.6, estão representados todos os provetes, moldados e impressos, submetidos a ensaios à flexão. No total foram ensaiados 20 provetes, sendo no mínimo 2 de cada tipologia. Os provetes impressos depois de cortados, apresentaram medidas que não corresponderam ás dos provetes moldados (Tabela 3.6). Nas tabelas com as características dos provetes a referência do provete é dada pelo tipo de argamassa, pelo fabrico impresso ou moldado, e pela ordem de ensaio 1º, 2º, 3º (...). Exemplo provete AM1 (argamassa A, moldado – M, ordem de ensaio 1º). Nestas tabelas apenas foram apresentadas as medidas dos provetes impressos, pois são os únicos que apresentam alterações na sua largura e altura (bxh). Os resultados foram obtidos com base na expressão (3.1.).

$$Resistência\ à\ flexão = \frac{1{,}5 \times Ff \times l}{bxh} \quad (3.1)$$

l – distância entre os apoios, em mm (100).
Ff - carga aplicada ao centro do prisma, em Newton.
b × h - largura e altura do prisma, em mm.

Tabela 3.6 – Detalhes de todos os provetes submetidos aos ensaios à flexão.

Provete	Impressão / Betonagem	Ensaio	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Coef. Variação (%)	Medidas b×h (mm)
AM1	03.05.2018	01.06.2018	15,0	14,4	5,2	-
AM2			14,8			-
AM3			14,6			-
AM4			13,3			-
AI1	10.05.2018	07.06.2018	13,0	12,9	-	41,1×35,1
AI2			12,9			37×33,0
BM1	17.05.2018	15.06.2018	17,2	18,9	18,1	-
BM2			17,6			-
BM3			17,6			-
BM4			25,1			-
BM5			17,3			-
BI1	08.05.2018	05.06.2018	23,2	20	-	41,9×39,8
BI2			16,9			39,5×29,4
CM1	08.05.2018	05.06.2018	37,0	36,2	11,3	-
CM2			39,1			-
CM3			37,7			-
CM4			29,0			-
CM5			38,3			-
CI1	10.05.2018	07.06.2018	28,6	31,7	-	42×41,0
CI2			34,8			28,3×40

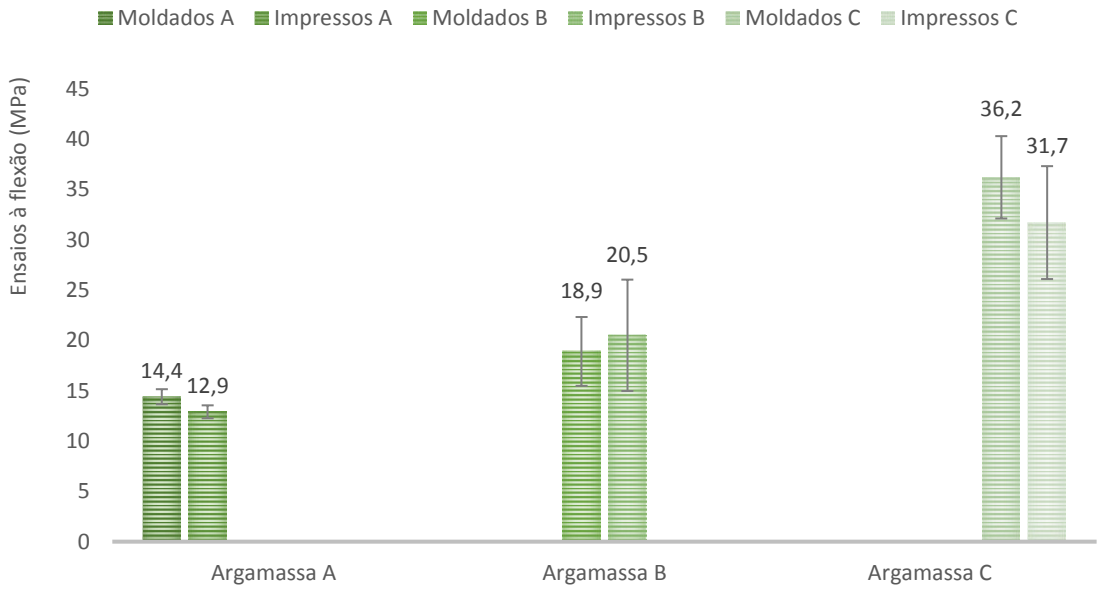


Figura 3.35 – Média dos resultados obtidos nos ensaios à flexão.

No final dos ensaios à flexão, podemos concluir que a inclusão de fibras melhorou consideravelmente a resistência à flexão, tendo um aumento de 151%,

desde a argamassa A até a argamassa C. A argamassa B possui um aumento de resistência de 30% relativamente à argamassa sem fibras (Figura 3.35).

Comparando os provetes impressos com os moldados, comprovamos que existe uma perda de propriedades nos provetes impressos, com exceção do provete BI1 que apresenta um valor de 8% acima do valor médio dos provetes moldados (Tabela 3.6). A argamassa A e C possuem discrepâncias maiores entre provetes moldados e impressos, sendo as perdas de 10 e 12%, respetivamente. Em geral, observa-se que os resultados dos provetes moldados apresentam uma maior dispersão.

Podemos ainda concluir que a inclusão de fibras aumentou a ductilidade dos provetes (Figura 3.36).

Figura 3.36 – Ensaio à flexão em provete impresso com fibras metálicas de 13mm.

3.3.3. Ensaio à Compressão

Nos ensaios à compressão foram utilizadas duas partes resultantes dos ensaios dos provetes à flexão (Figura 3.37). A expressão utilizada para o cálculo da resistência à compressão foi a expressão (3.2).

$$Resistência\ à\ compressão\ (MPa) = \frac{Fc}{bxh} \quad (3.2)$$

Fc- carga máxima na rotura, em Newton.
b × h - largura e altura do prisma, em mm.

Figura 3.37 – Provetes durante ensaios à compressão argamassa A e argamassa C, respetivamente.

Na tabela 3.7 estão representados todos os provetes, moldados e impressos, junto com os respetivos resultados dos ensaios realizados à compressão. Na figura 3.38 estão representados graficamente os resultados dos mesmos ensaios.

Tabela 3.7 – Detalhes de todos os provetes submetidos aos ensaiados à compressão.

Provete	Impressão /Betonagem	Ensaio	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Coef. Variação (%)	Medidas LxA (mm)
AM1.1	03.05.2018	01.06.2018	100,1	96,3	5	-
AM1.2			91,2			
AM2.1			96,7			-
AM2.2			99,7			
AM3.1			94,8			-
AM3.2			99,2			
AM4.1			100,1			-
AM4.2			91,2			
AI1.1	10.05.2018	07.06.2018	76,9	65,5	27,5	42,8x41,0
AI1.2			83,4			
AI2.1			57,3			28,3x40
AI2.2			44,2			
BM1.1	17.05.2018	15.06.2018	105,7	109,9	7,8	-
BM1.2			103,5			
BM2.1			98,0			-
BM2.2			111,4			
BM3.1			108,2			-
BM3.2			102,2			
BM4.1			120,1			-
BM4.2			126,3			
BM5.1			109,9			-
BM5.2			114,4			
BI1.1	08.05.2018	05.06.2018	112,5	108,9	16,7	41,9x39,8
BI1.2			114,7			
BI2.1			82,9			39,5x29,4
BI2.2			125,3			
CM1.1	08.05.2018	05.06.2018	133,1	123,4	6,6	-
CM1.2			129,4			
CM2.1			127,9			-
CM2.2			124,2			
CM3.1			132,7			-
CM3.2			120,1			
CM4.1			127,1			-
CM4.2			105,8			
CM5.1			132,3			-
CM5.2			131,7			
CI1.1	10.05.2018	07.06.2018	101,4	97,0	6	42,8x41,0
CI1.2			93,7			
CI2.1			102,6			28,3x40
CI2.2			90,5			

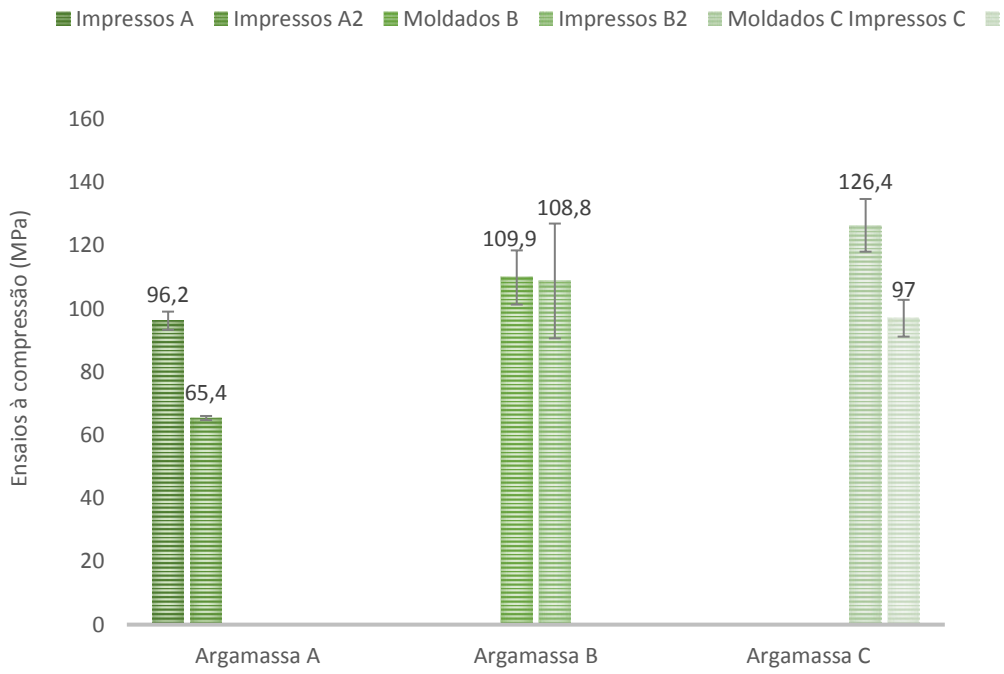


Figura 3.38 – Valores médios obtidos nos ensaios à compressão.

Nos provetes moldados temos novamente, um ganho de resistência com a inclusão de fibras, embora não tão pronunciada como no caso da flexão. Como esperado a argamassa C foi a que teve maior aumento de resistência com 31%, enquanto a argamassa B, teve um aumento de 14%.

Nos provetes impressos volta a haver maior diferença de valores na argamassa A, com perdas de 32% face aos provetes moldados, e na argamassa C de 23%. A argamassa B volta a ser a que apresenta menores diferenças nos resultados entre provetes moldados e impressos, com perdas de apenas 1%.

Nos dois ensaios, a diferença entre provetes moldados e impressos, pode ser justificada com a perda de trabalhabilidade da mistura, que poderá ter resultado, numa pior ligação entre camadas. Podemos ainda concluir que a inclusão de fibras, junto com uma boa trabalhabilidade da argamassa, pode contribuir para uma melhor ligação entre camadas, contrariando a perda de resistência nos provetes impressos (Figura 3.38).

3.4. Absorção de água por Capilaridade

A durabilidade é uma propriedade do betão capaz de resistir à ação de intemperismo, abrasão ou um outro processo de deterioração (Subathra Devi 2018). Para tal, o betão terá de resistir a condições meteorológicas adversas (congelamento e descongelamento), e ao transporte de agentes agressivos para o seu interior (exemplo de água pura ou com agentes agressivos, dióxido de carbono, oxigénio, cloretos ou sulfatos). Existem três processos para controlo do transporte de agentes agressivos desde a camada superficial de betão até ao seu interior, são eles a absorção capilar, permeabilidade e a difusão (Nunes 2001).

Para determinar a resistência do material à penetração de água e agentes agressivos ou gases, foram submetidos a ensaios de absorção de água por capilaridade os provetes impressos e moldados, com intuito de determinar a influência da impressão 3D na durabilidade do material. Este ensaio, realizado segundo a recomendação da RILEM, RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability (RILEM 1999), apresenta uma série de etapas antes da obtenção dos resultados. Numa primeira fase os provetes, curados durante 28 dias segundo as mesmas condições, são submetidos a um período de secagem controlada, numa estufa vertical, a uma temperatura constante de 40°C, até atingir massa constante. A massa é considerada constante quando num determinado período, o provete atinge nas diversas pesagens, um diferencial inferior a 0,1 %, sendo considerado seco. A face considerada no ensaio foi escolhida com base na mesma direção dos ensaios mecânicos, correspondendo à superfície lateral dos provetes (Figura 3.39). Essa superfície é mantida a uma profundidade máxima de 3 mm, sem estar em contacto com o recipiente e com o nível de água constante ao longo de todo o ensaio.

Figura 3.39 – Provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Nas figuras 3.40, 3.41 e 3.42 estão representadas as retas de ajuste com os resultados realizados aos provetes moldados e impressos. Sendo nomeada a letra A para os provetes sem fibras a letra B para os provetes com fibras de 6 mm e a letra C para os provetes com fibras de 13 mm.

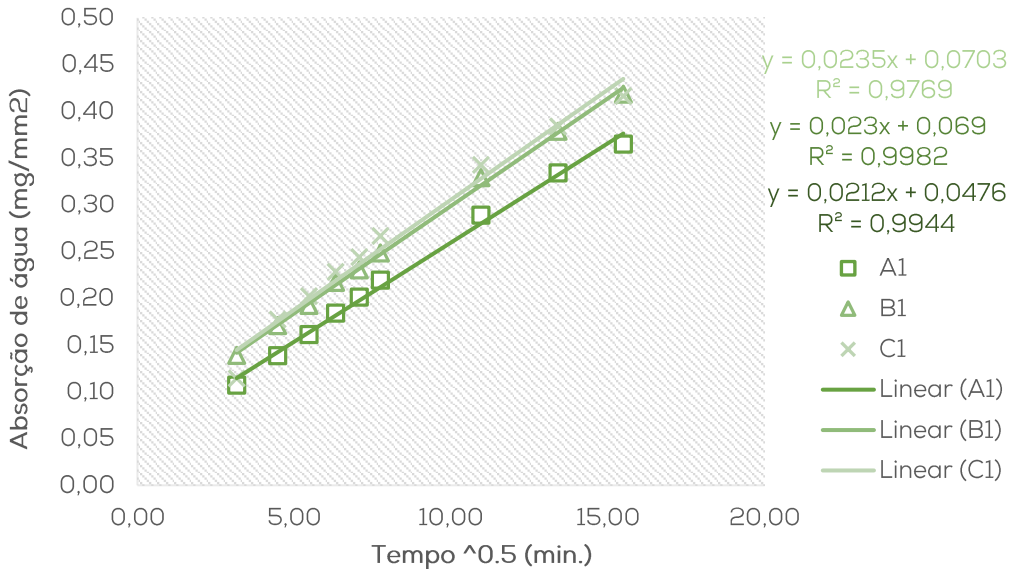


Figura 3.40 – Retas de ajuste dos resultados com os provetes impressos.

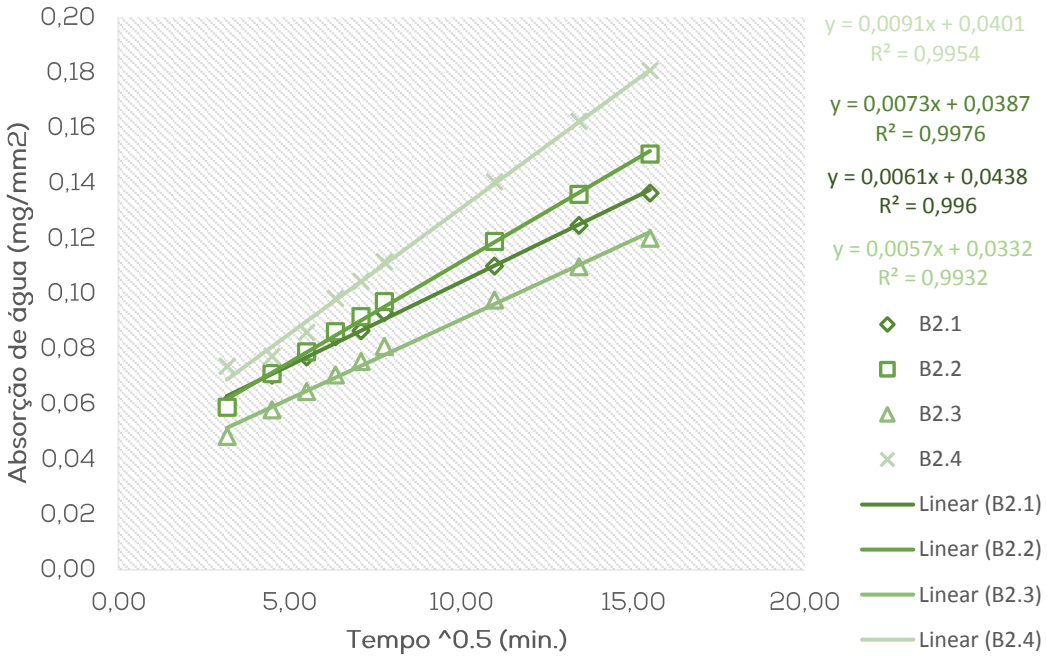


Figura 3.41 – Retas de ajuste dos resultados dos provetes moldados com a argamassa B.

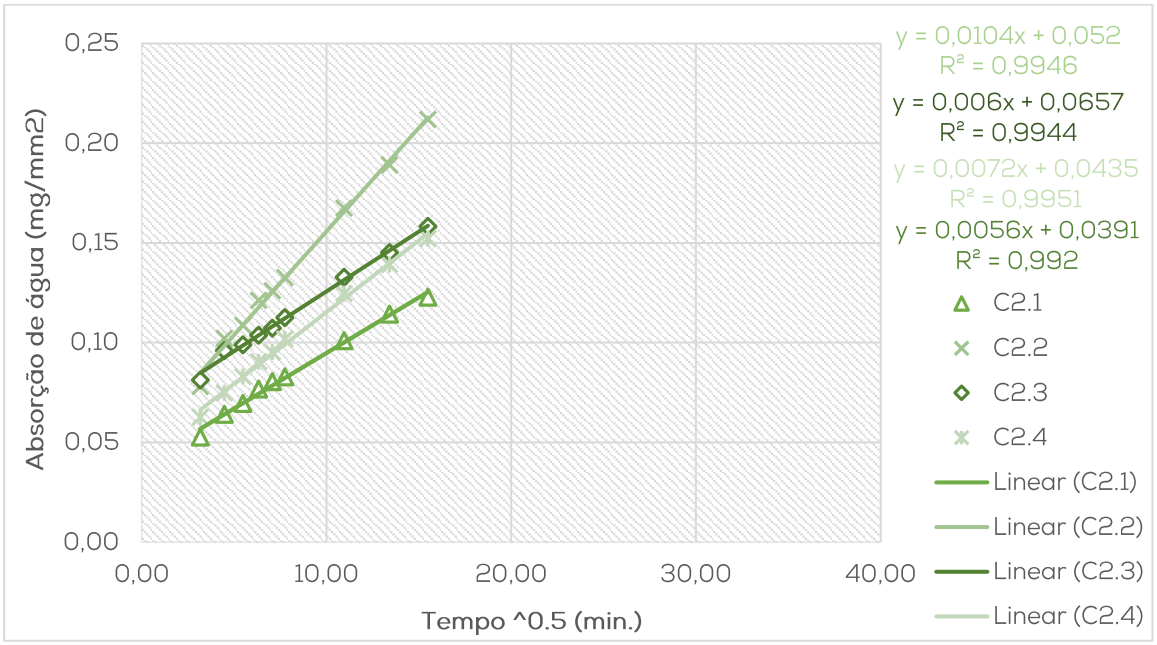


Figura 3.42 – Retas de ajuste dos resultados dos provetes moldados com a argamassa C.

Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios de absorção em 4 horas.

Provetes		Resultados 4 horas		
		Absorção	Ordenada na origem	Coeficiente de correlação
		S ((mg/mm^2)/min^0,5)	S0	R^2
Impressos	A1	0,021	0,047	0,99
	B1	0,023	0,069	1,00
	C1	0,024	0,070	0,98
Moldados	B2.1	0,006	0,044	1,00
	B2.2	0,007	0,039	1,00
	B2.3	0,005	0,033	0,99
	B2.4	0,009	0,010	1,00
	C2.1	0,006	0,039	0,99
	C2.2	0,010	0,052	0,99
	C2.3	0,006	0,066	0,99
	C2.4	0,007	0,0435	1,00

Ao comparar os resultados obtidos entre provetes impressos (Tabela 3.8) podemos observar que não existe grande variedade entre eles, o que demonstra que a inclusão de fibras não tem uma influência muito significativa na absorção de água por capilaridade. A média do coeficiente de absorção obtido para os provetes impressos foi de 2,26 x 10^{-2}. Os provetes impressos tiveram um menor número de amostras devido ao tempo gasto no seu fabrico. No entanto, obteve-se uma absorção de água significativamente maior nos provetes impressos do que nos provetes moldados, que provavelmente foi promovida pela zona de ligação entre camadas sucessivas. Nos provetes moldados temos uma média do coeficiente de 7,0x10^{-3} em B, e de 7,3x10^{-3} em C.

Assim podemos concluir que os provetes impressos têm menor resistência à penetração de água e agentes agressivos, o que poderá diminuir a durabilidade de peças impressas.

3.5. Conclusões

Para que haja condições ótimas para a impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, é necessário que o material possua uma serie de requisitos, nomeadamente "workability", "extrudability" e "buildability". Assim como, o sistema de impressão deve ser capaz de o extrudir e depositar, de maneira controlada, com movimentos precisos e constantes.

Para cumprir com os requisitos anteriores foi feita uma otimização do extrusor, proporcionando-lhe maior pressão. Neste sistema, semelhante a uma seringa, quanto maior a pressão maior será a capacidade de extrusão.

A perda de fluidez ao longo do tempo foi um dos parâmetros estudados ao longo deste trabalho. Baseado em testes de espalhamento e impressão de filamentos ao longo do tempo, concluímos que a inclusão de fibras e o seu cumprimento têm influência na trabalhabilidade da argamassa. Assim sendo, comprovou-se que a impressão, com uma argamassa, com fibras na sua composição, apresenta melhor "buildability" que uma argamassa sem fibras.

Apesar da perda de fluidez, a inclusão de fibras e o seu comprimento afetam de forma positiva as propriedades mecânicas do material. Durante os ensaios de flexão e compressão, concluímos que a argamassa B é a que apresenta menor perda de propriedades entre provetes moldados e impressos.

Com base nos ensaios de perda de fluidez ao longo do tempo, e perante os ensaios mecânicos concluímos que a argamassa com melhores propriedades para impressão é a argamassa B, pois apresenta boa "printability" assim como resistências mecânicas interessantes para a impressão de peças. Nestes ensaios ficou também comprovado, através da impressão dos provetes, que a impressão com um bocal de secção transversal retangular, proporciona melhores acabamento que a impressão com um bocal de secção transversal redonda.

Nos ensaios de absorção de água por capilaridade foi concluído que a impressão 3D apresenta piores resultados que os métodos tradicionais, devido às zonas de ligação entre camadas.

Durante a impressão de objetos, deveremos ter em conta que a inclusão de fibras metálicas aumenta a agressividade ao tato na superfície, podendo ser prejudicial em algumas peças de caráter funcional.

Capítulo 4

4. Peças Impressas

Durante o presente capítulo serão apresentadas as peças impressas, que comprovam a "printability" das argamassas desenvolvidas. No total foram impressas 3 peças: duas com geometria ortogonal e duas com geometria cilíndrica. Nas impressões foram utilizadas: argamassa A na impressão da primeira peça, e a argamassa B na impressão das restantes. Foi introduzido sobre a mesa de impressão uma outra mesa com movimentos rotacionais, para impressão das peças cilíndricas.

Por falta de automatização do sistema a modelação tridimensional não foi utilizada, no entanto, foi feito um planeamento onde se estudou o posicionamento inicial do bocal assim como a subida ao longo da impressão.

Apesar do bocal de secção transversal retangular apresentar melhores resultados, os bocais utilizados foram de secção transversal redonda, devido ao sistema de impressão estar condicionado a movimentos básicos nos eixos x, y e z. Embora existam vários requisitos para uma boa impressão como a velocidade de impressão, o tempo de deposição entre camadas, o controlo de movimentos,

entre outros, foi explorada maioritariamente a influência da altura do bocal face à superfície de impressão devido às limitações do nosso sistema de extrusão.

Por último serão comparados os resultados de todas as impressões realizadas durante todo o caso prático.

4.1. Peça de Geometria Ortogonal

Após a impressão dos filamentos foi impressa uma peça, sem finalidade funcional ou estética, apenas com o intuito de provar a deposição em camadas com argamassa A. Apesar da simplicidade, foram retiradas informações fundamentais para as impressões seguintes. Na figura 4.1 estão apresentadas duas imagens, de topo e de perfil, da peça impressa com a argamassa A e o bocal de 23 mm de diâmetro.

Figura 4.1 – Peça impressa com sobreposição de camadas.

A peça foi impressa durante um período de aproximadamente 3,5 minutos, com uma velocidade média de uma camada por minuto. A impressão teve início cerca de 12 minutos após o fim da amassadura, tempo estipulado nos ensaios anteriores para início de impressão com a argamassa A. O resultado é uma peça com dimensões médias de 164x250x46 mm. Durante a impressão o movimento do bocal no eixo Z foi feita, gradualmente, de 20 em 20 mm face à mesa de impressão. Ou seja, a primeira camada foi impressa a uma altura de 20 mm, a segunda a 40 mm e a terceira a 60 mm em relação à mesa de impressão (Figura 4.1). Apesar da altura do bocal ser ligeiramente inferior ao diâmetro do bocal (regra a ≥ h), a distância entre a superfície de impressão e o bocal foi variando devido ao abatimento das camadas. Este efeito resultou numa maior altura do que abertura do bocal nas camadas 2 e 3 (a ≤ h), aumentando a espessura da camada e alterando a geometria do filamento.

Os resultados negativos são visíveis na figura 4.2, onde podemos visualizar vazios com maior amplitude na zona de ligação entre a 2ª e a 3ª camada, devido à falta de compactação e perda de fluidez do material ao longo do tempo, que resulta em filamentos arredondados. Esta geometria arredondada diminui a qualidade de ligação entre camadas, principalmente nas camadas laterais, criando vazios que fragilizam a peça. Este problema está esquematicamente representado na imagem da figura 4.3.

Figura 4.2 – Corte da peça impressa anteriormente, Figura 4.1.

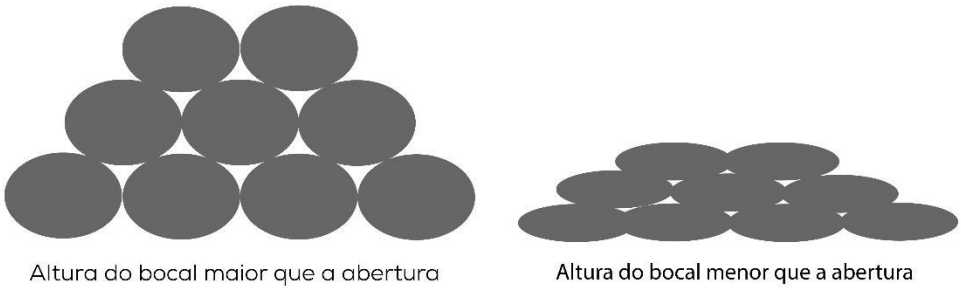


Figura 4.3 – Esquema que representa os vazios de uma impressão com menor ou maior compactação, respetivamente.

O ganho de consistência ao longo do tempo e a falta de compactação resultam ainda na forma piramidal da peça. Pois consoante o decorrer da impressão a largura do filamento fica cada vez mais curta. Outro fator que diminui a largura do filamento é o facto da 2ª e 3ª camada serem extrudidas sobre a argamassa ao contrário da 1ª camada que é depositada sobre um acetato, com índice de atrito bastante inferior.

Podemos então concluir que a regra presente na literatura, que estabelece que a abertura do bocal deve ser maior ou igual que a sua altura face à superfície de deposição ($a \geq h$), deve ser respeitada uma vez que tem grande influência na qualidade de ligação entre camadas.

4.2. Peças de Geometria Cilíndrica

A mesa de impressão, como já referido anteriormente, possui dois carris que proporcionam os movimentos nos eixos x e y, e que privilegiam a impressão de formas ortogonais simples. Para ultrapassar esta limitação foi desenvolvida uma mesa auxiliar, sobre mesa de impressão inicial, que proporcionou a impressão de formas cilíndricas simples. O conceito parte da mesa de oleiro, um mecanismo utilizado para o fabrico de peças em barro.

Na figura 4.4, está representado, esquematicamente, o mecanismo que permitiu acoplar a mesa giratória à mesa de impressão inicial e na figura 4.5 encontra-se a mesa giratória em contexto real no momento da instalação.

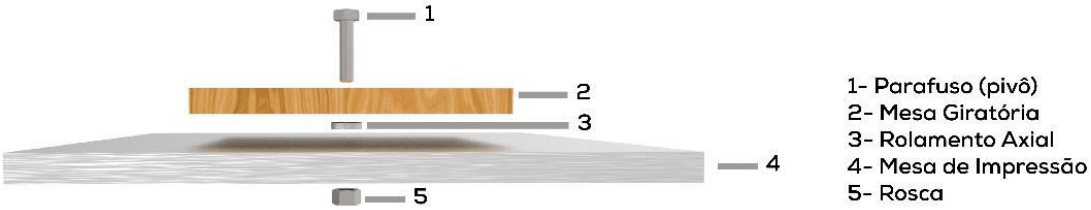


Figura 4.4 – Esquema com os componentes utilizados para o acoplamento da mesa giratória.

Figura 4.5 – Montagem e teste da mesa giratória.

4.2.1. Torre Cilíndrica

No primeiro teste de impressão, com mesa giratória, foi impressa uma torre cilíndrica com 80 mm de altura. Essa torre com 15 camadas de argamassa, e uma média de 5 mm de espessura por camada, foi impressa com um bocal de secção transversal circular de 15 mm de diâmetro, a uma altura constante de 10 mm nas primeiras 4 camadas e de 5 mm nas restantes, altura considerada face à superfície de impressão. Perante a impossibilidade de usar modelação 3D foi feito o planeamento da impressão em esquissos como o da figura seguinte.

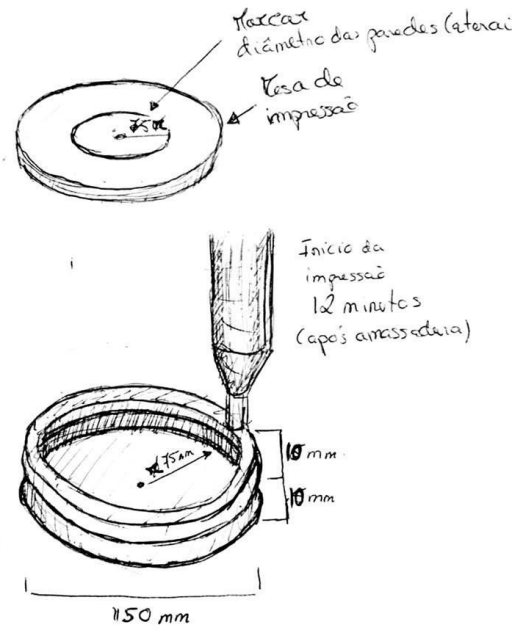


Figura 4.6 – Esquisso com planeamento da impressão da torre.

Para a impressão da primeira camada, aos 12 minutos após amassadura, foi posicionado o bocal num raio de 75 mm, em relação ao centro da mesa de impressão (Figura 4.7). Após a impressão, a base da torre apresentava um raio de 80 mm, o que demonstra um afastamento de 5 mm do raio inicial.

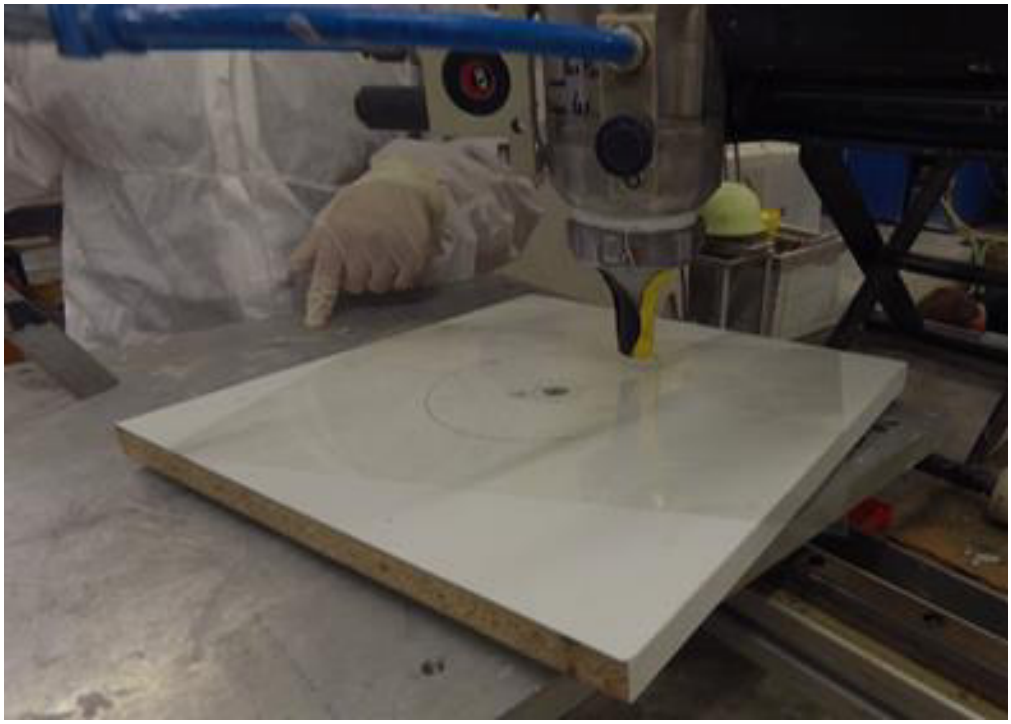


Figura 4.7 – Início do processo de impressão da torre cilíndrica com mesa giratória.

Figura 4.8 - Torre cilíndrica impressa com auxílio de mesa giratória, durante e após o processo de impressão.

Tal como na primeira peça, foi notado um ligeiro afunilamento desde a base até ao topo, que pode ser justificado pelo ganho de consistência do material que se traduz em filamentos de menor largura (Figura 4.8). Para contrariar algum desse afunilamento foi aumentada a compactação das camadas seguintes, alterando a altura do bocal para 5 mm, face à superfície de impressão, e diminuída a velocidade de impressão. Apesar destas alterações o raio do topo foi menor que o raio da base, com cerca de 10 mm de diferença, tendo a base 75 mm de raio enquanto o topo apenas 65 mm. O aumento da compactação e o consequente aumento da largura dos filamentos contribuiu para uma melhor estabilidade das camadas no momento de impressão, evitando colapsos nas camadas superiores. Na figura 4.9 são visíveis exemplos da queda dos filamentos nas primeiras camadas, quando o bocal apresentava uma altura de 10 mm.

Figura 4.9 – Pormenor que demonstra a queda de uma camada durante o processo de impressão.

Em conclusão a impressão desta peça comprovou a utilidade da mesa giratória na impressão de peças cilíndricas, por outro lado a redução do bocal para uma escala bastante inferior revelou alguns problemas na construção em altura, devido à menor área de contacto entre camadas, onde a falta de compactação e excesso de velocidade resultaram no deslizamento de alguns filamentos para as laterais da peça, assim como no seu afunilamento. Estes fatores que podem ser agravados ao longo da impressão com a perda de fluidez do material.

Podemos ainda concluir que a compactação tem também influência no acabamento superficial, logo esta deve ser estipulada segundo o tipo de peça, bocal e argamassa utilizada.

4.2.2. Peça Final

Tendo por base a impressão anterior foi impressa uma peça, com a mesma forma que a torre anterior, sendo a única diferença o acréscimo de uma base fechada. Nesta impressão, para além desta alteração foi otimizado o processo de impressão, com base nos problemas encontrados anteriormente. Com a inclusão de uma base fechada na peça será necessário, além de uma boa adesão entre camadas verticais, uma boa adesão nas camadas horizontais da base.

O processo de impressão partiu do processo anterior, tendo como referência uma circunferência com 75 mm de raio, no entanto, nesta impressão o bocal foi posicionado no centro da circunferência. Deste modo, a base foi impressa aproveitando a maior fluidez do material, no início da impressão, que contribuiu para uma boa adesão entre as camadas laterais. O início da impressão foi ainda antecipado para os 10 minutos, tendo como objetivo imprimir a base com o material num estado um pouco mais fluído que o pretendido nas impressões anteriores, melhorando a ligação entre as camadas laterais (Figura 4.10).

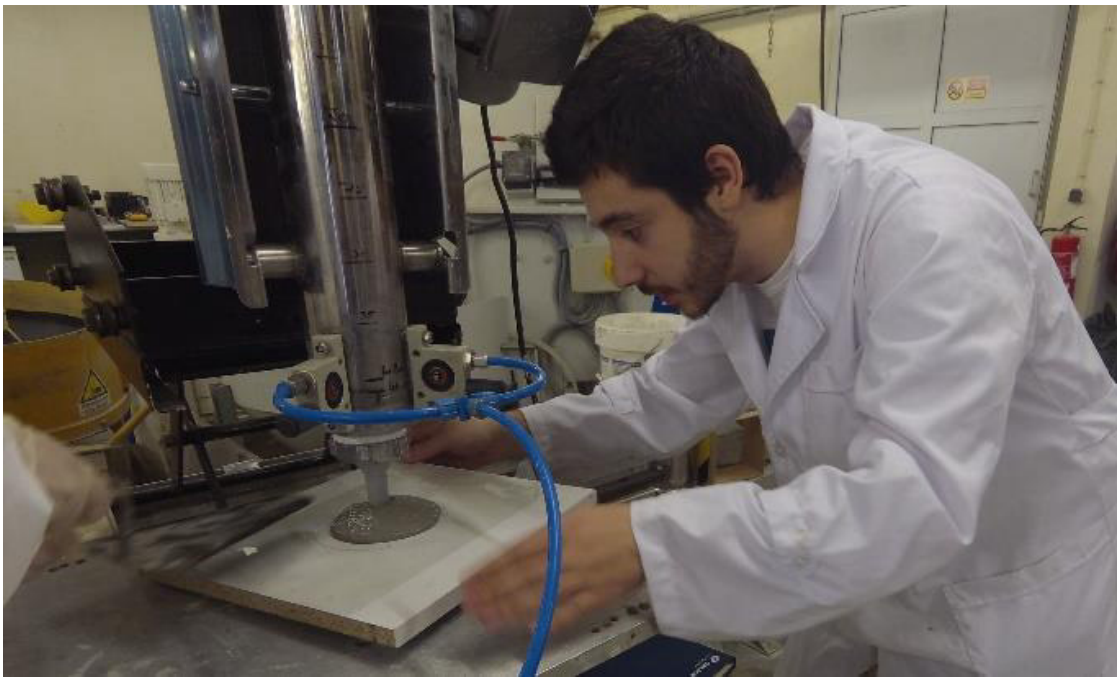


Figura 4.10 – Fase Inicial da Impressão do vaso.

A impressão da base foi feita desde o seu interior até ao exterior, proporcionando a impressão das laterais de forma contínua e sem interrupções. Ao contrário da peça anterior a altura do bocal foi aumentada gradualmente de 5 em 5 mm até ao topo da peça sem a necessidade de alterações. Esta alteração evitou os deslizamentos dos filamentos para as laterais, graças à maior compactação, melhorando a definição das camadas (Figura 4.11).

Na figura 4.11 é também visível que foi contrariado o afunilamento das camadas na impressão da peça final, esta contrariedade foi feita com a diminuição da velocidade de impressão junto com o aumento de compactação. O resultado foi uma peça com um ligeiro afunilamento no centro, e com um diâmetro da base semelhante ao diâmetro do topo.

Figura 4.11 – Vista de perfil e de topo da peça, respetivamente.

Após um dia de cura foi feito um teste de estanqueidade à peça impressa, que consistiu no seu enchimento com água até ao topo, pelo período de 24 horas. Durante esse tempo não foi descoberta nenhuma fuga na estrutura o que comprova a boa adesão entre as camadas.

4.3. Impressão com Material de Suporte

Com base no conceito explorado pela BetAbram, na revisão de literatura, foi utilizado areia como material de suporte, com o intuito de criar vazios nas paredes laterais da peça impressa, um conceito que poderá proporcionar uma maior liberdade geométrica na impressão 3D com materiais cimentícios. É uma técnica mista que utiliza a extrusão de material, do conceito FDM, assim como a deposição do material em grão, semelhante ao conceito 3D Printing, para suporte dos filamentos de argamassa extrudidos em zonas de vazios, até atingir a rigidez necessária.

Para abordar o conceito foi previamente produzida e afixada à mesa de impressão uma caixa com 250x250x110 mm^3, podendo ser reaproveitada para outras impressões. A peça a imprimir foi pensada para ser extremamente simples, devido há pouca automatização do sistema e à dificuldade do processo. Assim sendo o objetivo seria a impressão de um simples paralelepípedo com aberturas nas paredes laterais.

A areia utilizada foi previamente peneirada para que os grãos utilizados não fossem demasiado pequenos, pois areia com maior diâmetro seria mais fácil de limpar a superfície da peça.

Após escolha da areia, e mantendo o tempo do início da impressão da peça anterior (10 minutos), foi depositada no fundo da caixa uma fina camada dessa areia na qual foi extrudida a base da peça do centro até às extremidades. Depois da deposição de cada camada de argamassa foi depositada uma camada de areia, com a mesma altura, nos vazios deixados pela argamassa. Este processo foi repetido até ao final da peça e utilizou o bocal de 15 mm de abertura a uma altura constante de 5 mm face à superfície de impressão (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Processo de impressão com areia, como material de suporte.

Nas figuras 4.13 e 4.14 estão representadas imagens da peça impressa após cura e limpeza da areia, durante o período de cura foi colocado um pano húmido sobre a peça, possibilitando boas condições para hidratação do cimento. Apesar da limpeza com ajuda de uma escova de aço e de um compressor, são visíveis alguns grãos de areia na sua superfície, maioritariamente em zonas horizontais como a base e as aberturas laterais, sendo zonas onde a pressão sobre a areia foi maior.

As aberturas embora pequenas, comprovam a utilidade da técnica na criação de vazios na estrutura da peça, diminuindo o consumo de material. A nível estético a criação destas aberturas pode aumentar a sensação de leveza e transparência na peça.

Figura 4.13 – Peça impressa, vistas laterais.

Figura 4.14 – Peça impressa, aproximadamente com as dimensões de 145x142x105 mm^3.

No final, pudemos concluir que a impressão com um material de suporte proporciona vantagens e desvantagens para a impressão. Por um lado podemos obter peças de maior complexidade, com a inclusão de vazios e aberturas, por outro lado carece do uso de uma cofragem exterior que embora reutilizável dificulta o processo de impressão.

4.4. Conclusões

O estudo do comportamento do material ao longo do tempo, no capítulo anterior, foi fundamental para impressão de todas as peças presentes neste

capítulo. Sem esse estudo prévio existiriam inícios de impressão precoces ou entupimentos durante a impressão.

A altura do bocal é fundamental no processo de impressão, sendo a regra referenciada na literatura (a ≥ h) indispensável, abertura do bocal maior que a altura de deposição.

A perda de fluidez do material tendencialmente cria “efeito de pirâmide” nas peças o que deve ser contrariado com diminuição de velocidade de impressão e com o aumento da compactação.

5. Conclusões

Com a revisão de literatura foi concluído que a impressão 3D pode solucionar alguns problemas no fabrico com materiais cimentícios, através da capacidade de inclusão de material apenas onde este é necessário.

Existem várias abordagens ao tema de impressão 3D com materiais cimentícios, no entanto, o conceito que utiliza a impressão por via da extrusão de material é o mais utilizado, tendo vindo a crescer nos últimos anos com o aparecimento de novos projetos por meio do envolvimento de empresas, universidades, e alguns projetos privados.

Os componentes necessários para a realização de uma impressão com extrusão de materiais cimentícios são: misturadora para processo de amassadura da argamassa, bomba para transporte do material, podendo também ser efetuado manualmente em processos menos automatizados; impressora para realização dos movimentos e um extrusor para deposição do material.

No caso de estudo prático foi concluído que o material não pode ser projetado sem ter por base as características do sistema de impressão. Na fase inicial do trabalho foi necessária a otimização do extrusor, para que este pudesse extrudir o material nas condições ótimas de impressão. Essas condições de impressão são nomeadas na literatura estrangeira de "Workability", "Extrudability" e "Buildability", sem elas o material não é considerado imprimível ou detentor de "Printability".

Dos ensaios realizados no estado endurecido conclui-se que existem influências da impressão 3D no comportamento mecânico e na durabilidade das

peças. O comportamento mecânico pode ser melhorado com a inclusão de fibras na composição das argamassas, enquanto a durabilidade pode ser significativamente afetada.

Com base no capítulo 3 e comprovado no capítulo 4 concluímos que das 3 argamassas desenvolvidas a que apresenta melhores propriedades para impressão é a argamassa B, sendo que deve ser escolhida tendo em conta a funcionalidade da peça, uma vez que possuí alguma rugosidade superficial devido às fibras metálicas usadas na sua composição.

O capítulo 4 comprova a "Printability" das argamassas desenvolvidas. Sendo a peça final a impressão com melhores resultados, fruto da aprendizagem nas impressões anteriores. Nele ficou comprovado que a altura do bocal face à superfície de impressão deve ser sempre inferior à sua abertura. Numa última peça foi ainda explorado a impressão com um material de suporte, a areia, um conceito que poderá permitir a impressão de qualquer forma apesar de piorar o acabamento superficial.

Com base no trabalho exposto no presente documento foi elaborado e admitido um poster para a participação na conferência MDA 2018, 2nd International Conference on Materials Design and Applications, realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, nos dias 5 e 6 de julho (Anexo C).

Foi ainda admitido um artigo para participação na conferência CONSTRUÇÃO 2018 – reabilitar e construir de forma sustentável, que se realizará de 21 a 23 de novembro, no Porto.

6. Limitações e Trabalhos Futuros

Nos parágrafos seguintes são apresentadas algumas limitações presentes no trabalho desenvolvido, que devem ser resolvidas para o estudo e desenvolvimento da tecnologia no futuro.

A maior limitação sentida durante a realização deste trabalho foi a falta de automatização do sistema de impressão, que impossibilitou o controlo da velocidade e dos movimentos de impressão, importantíssimos para a obtenção de impressões com boa qualidade, assim como o estudo da tecnologia com rigor. Deve, então, ser projetado um sistema de impressão onde pelo menos os movimentos sejam controlados automaticamente, permitindo que a impressão seja feita com base em modelações 3D e não com movimentos manuais.

Devem também, ser desenvolvidos materiais com menor quantidade de cimento na sua composição, com o intuito de aumentar o carácter sustentável da tecnologia. No desenvolvimento desses materiais poderá ser pensada a inclusão da cor para aumentar a qualidade estética.

7. Referências

3Dnatives. 2018. "MIT Engineers make a 10X Faster FDM 3D Printer!". Última atualização 2018. Acedido a 10 de setembro de 2018. https://www.3dnatives.com/en/mit-10x-faster-3d-printer-011220174/.

3DR Holdings, Eddie Krassenstein. 2015. "Lund University Students Create Mobile 3D Printer to Print Concrete Furniture & Art, with Sights Set on 3D Printed Houses". *3DPrint.com*. Acedido a 23 de fevereiro de 2018 https://3dprint.com/85754/diegel-3d-printed-furniture/.

Ai, Jumei e Ping Du. 2014. "Discussion on 3D print model and technology". *Applied Mechanics and Materials* no. 543-547:130-3. Acedido a 20 de dezembro de 2017 http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.130.

Alec. 2015. "Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes". *www.3Ders.org*, 8 de setembro de 2015 Acedido a 15 de fevereiro de 2018. http://www.3ders.org/articles/20150909-lewis-grand-hotel-andrey-rudenko-to-develop-worlds-first-3d-printed-hotel.html.

———. 2016a. "Alex Le Roux 3D prints livable concrete structure 'Tiny House' in just 24 hours". *www.3ders.org*, 20 de junho de 2016. Acedido a 19 de fevereiro de 2018 https://www.3ders.org/articles/20160620-alex-le-roux-3d-prints-livable-concrete-structure-tiny-house-in-just-24-hours.html.

———. 2016b. "Bruil develops high resolution concrete 3D printing technique and white or colored concrete". *www.3ders.org*. Acedido a 7 de fevereiro de 2018 https://www.3ders.org/articles/20160128-bruil-develops-high-resolution-concrete-3d-printing-technique-and-white-or-colored-concrete.html.

Alec, www.3Ders.org. 2016c. Bruil develops high resolution concrete 3D printing technique and white or colored concrete. https://www.3ders.org/articles/20160128-bruil-develops-high-resolution-concrete-3d-printing-technique-and-white-or-colored-concrete.html.

Andrey Rudenko e 201? "3D Concrete House Printer inventor". Acedido a 24 de fevereiro de 2018 https://www.linkedin.com/in/andrey-rudenko-624b84b0/.

Anell, Lars Henrik. 2015. "Concrete 3D printer". Master Division of Machine Design, Department of Design Science,Faculty of Engineering LTH Lund University Acedido a 23 de fevereiro de 2018 https://www.google.pt/search?ei=45YzW4CRBqKTgAb6gpTABQ&q=anell+2015+lund+university&oq=anell+2015+lund+university&gs_l=psy-ab.3..33i22i29i30k1l2.6883.11837.0.12208.16.16.0.0.0.0.284.2820.0j13j3.16.0....0...1.1.64.psy-ab..0.15.2657...0i13i30k1j0i13i5i30k1j0i8i13i30k1j33i21k1j33i160k1.0.Iq6q2yPhK9E.

Anes Jakupovic, 3DPrinthuset. 201? XTREEE - REPORT. http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/XtreeE.pdf.

apis cor. 2016a. "3D printer". Acedido a 20 de fevereiro de 2018 http://apis-cor.com/en/3d-printer.

———. 2016b. "About us ". Acedido a 20 de fevereiro de 2018 http://apis-cor.com/en/about/who-we-are.

———. 2016c. "Apis Cor". Acedido a 20 de fevereiro de 2018 https://www.linkedin.com/company/10320739/.

———. 2017a. "Features and perspectives of 3D-printing". *apis cor* 18 de agosto de 2017 Acedido a 24 de abril de 2018 http://apis-cor.com/en/about/blog/features-and-perspectives-of-3d-printing.
———. 2017b. "Future is now ". *apis cor* 21 de janeiro de 2017 Acedido a 24 de abril de 2018 http://apis-cor.com/en/about/blog/geocement-new-generation-hightech-material.
Arlt., R. 2018. "The-Einstein-Tower". *ResearchGate*, março de 2011. Acedido a 20 de junho de 2018. https://www.researchgate.net/figure/1-The-Einstein-Tower-1924-is-an-astrophysical-observatory-and-also-a-masterpiece-of_fig3_261993744.
AstroScience. 2017. "SLA vs SLS vs FDM". *Astro Science 3D*, 8 de maio de 2017 Acedido a 14 de janeiro de 2018 https://www.astroscience3d.com/single-post/2017/05/07/SLA-vs-SLS-vs-FDM.
AUTODESK, INC 2015. "3D Printing Concrete: A 2,500-Square-Foot House in 20 Hours and an Eye on a Moon Shot". *Redshift*, 4 de novembro de 2015 Acedido a 20 de março de 2018 https://www.autodesk.com/redshift/3d-printing-concrete/.
B.V., Materia Exhibitions. 2016. "3D Printed Architectural Concrete @ MX2016". Acedido a 7 de fevereiro de 2017 https://materia.nl/article/3d-printed-architectural-concrete-mx2016/.
Bak, David. 2003. "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter". *Assembly Automation* no. 23 (4):340-345. Acedido a 17 de dezembro de 2017. http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01445150310501190.
Barros, Kléber da Silva e Peggy Zwolinski. 2016. "Influence of the Use/User Profile in the LCA of 3d Printed Products". *Procedia CIRP* no. 50:318-323. Acedido a 20 de julho de 2018 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116304292.
BetAbram. 2016a. "BetAbram". Acedido a 28 de janeiro de 2018 http://betabram.com/.
———. 2016b. "Our Printers". Acedido a 28 de janeiro de 2018 http://betabram.com/printers.html.
betabram_videos. 2015. "BetAbram 3D House Printer". Youtube vídeo, 00:01:31. Acedido a 26 de abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=KQC7ypTnSm0.
———. 2017. "BetAbram P1 (3D House printer) - Official video". Youtube vídeo, 00:01:31. Acedido a 26 de abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=q0QbyW7xCZw.
BEYOND. 2015. "BEYOND | pavilion of innovation 2015". Última atualização 2015. Acedido a 3 de jneiro de 2018 http://beyond.iaac.net/?page_id=1790.
Bos, F., R. Wolfs, Z. Ahmed e T. Salet. 2016. "Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing". *Virtual and Physical Prototyping* no. 11 (3):209-25. Acedido a 12 de outubro de 2017 http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867.
Bruil. 2017. "3D printen van Architectonisch beton". Youtube vídeo 00:01:40. Acedido a 2 de maio de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=0lguuJgpFHo.
Bruil BV. 2018. "Bruil innovatie > 3D printen". Acedido a 2 de maio de 2017 https://www.bruil.nl/doelgroepen/alles-voor-architecten/3dprinten.
BuiltWorlds Voices. 2016. "3D Printing on the Moon and underwater | D-Shape Enterprises". Youtube vídeo, 00:01:34. Acedido a 5 de fevereiro de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=WLSX9kl9szc.
Catalunya, Institut d'Arquitectura Avançada de. "About ". Acedido a 11 de janeiro de 2018 https://iaac.net/iaac/about/.
———. "Minibuilders". Acedido a 11 de janeiro de 2018 https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/.
Caxin, WinSun 2015. "Vários edifícios impressos em 3D em Suzhou foram revelados". *Caixin* Acedido a 24 de abril de 2018 http://photos.caixin.com/2015-01-19/100775775_5.html#picture.
Cimpor. 2017a. "Cimentos e Cal Hidráulica". Acedido a 4 de dezembro de 2017. http://www.cimpor-portugal.pt/marcas_home.aspx?lang=pt&id_object=9.
———. 2017b. "Produção Cimento ". Acedido a 04 Dezembro de 2017. http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento.
Clare Scott, 3DR Holdings. 2017. "3D Printing Completed on 3D Printhuset's Building On Demand", 21 de novembro de 2017 Acedido a 3 de março de 2018 https://3dprint.com/195020/3d-printhuset-building-on-demand/.

concreteprinting. 2010. "Future of Construction Process: 3D Concrete Printing". Youtube vídeo, 00:03:11. Acedido a 4 de março de 2018 https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=EfbhdZKPHro.
Construtions-3D. 2018a. "Constructions-3D vous souhaite ses meilleurs voeux pour 2018". *Construtions-3D*, 25 de janeiro de 2018 Acedido a 27 de abril de 2018 https://www.constructions-3d.com/blog-1.
———. 2018b. "Projects printed with our machine". Acedido a 27 de abril de 2018 https://www.constructions-3d.com/printed-projects.
———. 2018c. "Technical Documentation ". Acedido a 27 de abril de 2018 https://www.constructions-3d.com/technical-data.
———. 2018d. "Turnkey solution for concrete 3D printing on site". Acedido a 27 de abril de 2018 https://www.constructions-3d.com/copie-de-fiche-produit.
Contour Crafting Corporation. 2017. "Introducing Contour Crafting Technology". Acedido a 22 de dezembro de 2017 http://contourcrafting.com/.
CustomPartNet. 2018a. "3D Printing ". Acedido a 28 de fevereiro de 2018 http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing.
———. 2018b. "Fused Deposition Modeling (FDM)". Acedido a 24 de fevereiro de 2018 http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling.
CyBe Construction. 2014. " Promomovie CyBe, ProTo R 3DP and CyBe mortar". Youtube vídeo, 00:02:10. Acedido a 26 de Fevereiro de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=sEO1it8k-gM.
———. 2017a. "About CyBe ". Acedido a 22 de maio de 2018 https://www.cybe.eu/aboutcybe/.
———. 2017b. "CyBe Mortar". Acedido a 2 de fevereiro de 2018 https://www.cybe.eu/cybemortar/.
———. 2017c. "CyBe RC 3DP | CyBe R 3DP". Acedido a 2 de fevereiro de 2018 https://cybe.eu/3d-concrete-printers/#1520593810839-083e40e7-6c20.
———. 2017d. "INDUSTRIAL 3D CONCRETE PRINTER". Acedido a 22 de maio de 2018 https://www.cybe.eu/cybe-r-3dp/.
———. 2017e. "Redrone Laboratory". Acedido a 2 de fevereiro de 2018 https://cybe.eu/portfolio-item/3dhousing05/.
———. 2018. "3D Housing 05 | Villa". Acedido a 22 de maio de 2018 https://cybe.eu/portfolio-item/3dhousing05/.
Daudé, Basílica de la Sagrada Família/Pep. 201? "Galeria fotogràfica". Acedido a 8 de junho de 2018 http://www.sagradafamilia.org/galeria-fotografica/.
decoist.com. 2008. "Futuristic 3D Printed House Takes Shape Next To Amsterdam's Famous Canals". Última atualização 2018. Acedido a 4 de janeiro de 2018. https://www.decoist.com/2014-01-23/3d-printed-house-amsterdam/.
Dini, Enrico. 2018. "D-Shape ". Acedido a 20 de dezembro de 2017 https://d-shape.com/the-technology/.
Doomen, C.C.M. 2016. "The Effect of Layered Manufacturing on the Strength Properties of Printable Concrete", Eindhoven University of Technology. Acedido a 24 de abril de 2018 https://pure.tue.nl/ws/files/51163965/Doomen_2016.pdf.
Doris. 2016. "Concrete 3D Printer Creates Tiny House In Just 24 Hours". *3Printr.com*, 21 de junho de 2016. Acedido a 19 de fevereiro de 2018. https://www.3printr.com/concrete-3d-printer-creates-livable-tiny-house-3340343/.
———. 2018. "WinSun 3D Prints Villa and Apartment Building – Update". *3DPrintr.com*, 16 de março de 2015. Acedido a 24 de abril de 2018 https://www.3printr.com/winsun-3d-prints-villa-apartment-building-3827111/.
EIT Climate-KIC 2018. "CyBe Construction B.V.". Acedido a 22 de maio de 2018 http://www.climate-kic.org/start-ups/cybe-construction-b-v-2/.
Fabbaloo. 2014. "Contour Crafting Update". *Fabbaloo*, 2 de janeiro de 2014. Acedido a 2 de março de 2018 http://www.fabbaloo.com/blog/2014/1/2/contour-crafting-update.html.
Ferreira, Rui Miguel e Said Jalali. 2002. "Betão autocompactável: influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes". Acedido a 24 de abril de 2018 https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2539/1/Pag_29-44.pdf.
Goldin, MELISA. 2014. "Chinese Company Builds Houses Quickly With 3D Printing". *mashable.com, April* no. 29. Acedido a 18 de janeiro de 2018 http://alpha-

3d.com/images/dt/slideshowhome_vn/18dyn_NG036-Chinese%20Company%20Builds%20Houses%20Quickly%20With%203D%20Printing.pdf.
Hager, Izabela, Anna Golonka e Roman Putanowicz. 2016. "3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?". *Procedia Engineering* no. 151 (Supplement C):292-299. Acedido a 1 de dezembro de 2017. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317453.
Hull, Charles W. 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US4575330 A, submetida em 8 de agosto de 1984, publicada a 11 de março de 1986. Acedido a 14 de dezembro https://www.google.com/patents/us4575330.
Hwang, Dooil e Behrokh Khoshnevis. 2004. "Concrete wall fabrication by contour crafting". Comunicação apresentada em 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea.
IAAC. 201? "Small robots printing big structures". Acedido a 22 de março de 2018 http://robots.iaac.net/#robots.
Industry, 3D Printing. 2014. "Buy a 3D House Printer for 12 000 €, Print a House ". Última atualização 2017. Acedido a 28 de janeiro de 2018. https://3dprintingindustry.com/news/buy-3d-house-printer-e12000-print-house-27760/.
Informa USA, Inc. 2015. "What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering?". Acedido a 10 de janeiro de 2018 http://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering.
Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya. 2018a. "About ". Acedido a 11 de janeiro de 2018 https://iaac.net/iaac/about/.
———. 2018b. "Large Scale 3D Printing - 3D Printed Bridge ". Acedido a 11 de janeiro de 2018 https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/.
———. 2018c. "Minibuilders". Acedido a 11 de janeiro de 2018 https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/.
ISO/ASTM, 52900:2015. 2015. *ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing — General principles — Terminology*. Acedido a 10 de setembro de 2018 https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:69669:en.
Joel, Chris. 2013-2018. "Alex Le Roux a Reprap based 3D Concrete Printer ". *3D Printers Online Store*, 3 de agosto 201? Acedido a 19 de fevereiro de 2018 https://www.3dprintersonlinestore.com/alex-le-roux-making-a-reprap-based-3d-concrete-printer.
———. 2016. "Huashang Tengda Chinese Company Earthquake Proof Villa", 18 de junho de 2016. Acedido a 5 de fevereiro de 2018 https://www.3dprintersonlinestore.com/huashang-tengda-chinese-company-earthquake-proof-villa.
khorram niaki, Mojtaba e Fabio Nonino. 2015. *The impacts of Additive Manufacturing on firms' competitiveness: An empirical investigation*.
Khoshnevis, B., D. Hwang, K. T. Yao e Z. Yeh. 2006. "Mega-scale fabrication by Contour Crafting". *International Journal of Industrial and Systems Engineering* no. 1 (3):301-320. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84903440021&partnerID=40&md5=0f9b901b47a3f46c5509ad75b31764ab.
Khoshnevis, B., Yuan Xiao, B. Zahiri, Zhang Jing e Xia Bin. 2016. "Construction by contour crafting using sulfur concrete with planetary applications". *Rapid Prototyping Journal* no. 22 (5):848-56. Acedido a 8 de dezembro http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-11-2015-0165.
Khoshnevis, Behrokh. 2004a. "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies". *Automation in Construction* no. 13 (1):5-19. Acedido a 4 de dezembro de 2017 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736.
———. 2004b. *Houses of the Future: Construction by Contour Crafting Building Houses for Everyone*. University of Southern California.
Kustom, Total. 201?-a. "3D - Printed Castel ". Acedido a 14 de fevereiro de 2018 http://www.totalkustom.com/photo.html.
———. 201?-b. "About Us ". Acedido a 14 de fevereiro de 2018 http://www.totalkustom.com/about-us.html.
———. 201?-c. "Pre-order". Acedido a 14 de fevereiro de 2018 http://www.totalkustom.com/pre-order.html.

Lehtinen, Antti. 2007. "3D Modeling a Human Head". *Second Picture*, 23 de outubro de 2007 Acedido a 4 de janeiro de 2018. http://www.secondpicture.com/tutorials/3d/3d_modeling_of_a_human_head_3ds_max_01.html.

Lim, S., R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb e T. Thorpe. 2012. "Developments in construction-scale additive manufacturing processes". *Automation in Construction* no. 21 (Supplement C):262-268. Acedido a 3 de janeiro de 2018. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580511001221.

Lim, Sungwoo, Richard A Buswell, Thanh T Le, Rene Wackrow, Simon A Austin, Alistair GF Gibb e Tony Thorpe. 2011. "Development of a viable concrete printing process". Comunicação apresentada em IAARC, em Seoul, Korea.

Linkedin. 2017. "XtreeE, the Large Scale 3D". Acedido a 2 de fevereiro de 2018 https://pt.linkedin.com/company/xtreee.

Loughborough University. 2018. "3D Concrete Printing". Acedido a 4 de janeiro de 2018 http://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/thetechnology/.

Ma, Guowei, Zhijian Li e Li Wang. 2018. "Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing". *Construction and Building Materials* no. 162:613-627. Acedido a 15 de maio de 2018 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817324546.

Malaeb, Zeina, Hussein Hachem, Adel Tourbah, Toufic Maalouf, NE Zarwin e Farook Hamzeh. 2015. "3D concrete printing: Machine and mix design". *International Journal of Civil Engineering* no. 6 (6):14-22. Acedido a 4 de dezembro de 2018. https://www.researchgate.net/profile/Farook_Hamzeh/publication/280488795_3D_Concrete_Printing_Machine_and_Mix_Design/links/55b608c308aec0e5f436d4a1/3D-Concrete-Printing-Machine-and-Mix-Design.pdf.

Matjaz Tanc Ic. "This Controversial Chinese Company Wants To 3-D Print Your Next House". *HuffPost*, 15 de abril de 2015 Acedido a 24 de abril de 2018 https://www.huffingtonpost.com/2015/04/15/3d-printing-buildings-china-winsun_n_7071610.html.

Miller, Daniel Bradford, William Bradley Glisson, Mark Yampolskiy e Kim-Kwang Raymond Choo. 2018. "Identifying 3D printer residual data via open-source documentation". *Computers & Security* no. 75:10-23. Acedido a 20 de julho de 2018 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404818300324.

Nemati, Kamran M. 2007. Formwork for Concrete. http://courses.washington.edu/cm420/Lesson1.pdf.

New China TV. 2014. "Video: Giant Chinese 3D printer builds 10 houses in just 1 day". Youtube vídeo, 00:01:28. Acedido a 24 de Abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=OloOc21_u80.

———. 2016. "World's first 3D-printed house that can withstand 8.0-magnitude quake". Youtube vídeo, 00:00:44. Acedido a 5 de fevereiro de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=OloOc21_u80.

Nunes, Sandra. 2001. "BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL:

TECNOLOGIA E PROPRIEDADES", Departamento de Engenharia Civil Universidade do Porto Acedido a 20 de junho de 2018

Peerless Media, LLC. 2012. "Monolite UK Wants to 3D Print You a House". Acedido a 11 de janeiro de 2018 http://www.rapidreadytech.com/2012/03/monolite-uk-wants-to-3d-print-you-a-house/.

Pegna, Joseph. 1997. "Exploratory investigation of solid freeform construction". *Automation in Construction* no. 5 (5):427-437. Acedido a 4 de dezembro de 2017 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580596001665.

Perrot, A., D. Rangeard e A. Pierre. 2016. "Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques". *Materials and Structures* no. 49 (4):1213-1220. Acedido a 10 de janeiro de 2018 https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0.

Printhuset, 3D. 2017a. "The BOD - How we 3D printed Europe's first house!". Youtube vídeo 00:01:04. Acedido a 28 de abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=Mgi398KG1hQ.

———. 2017b. "The BOD - Timelapse of the 3D printing process". Youtube vídeo 00:00:43. Acedido a 28 de abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=aZHsaaG7nTM.

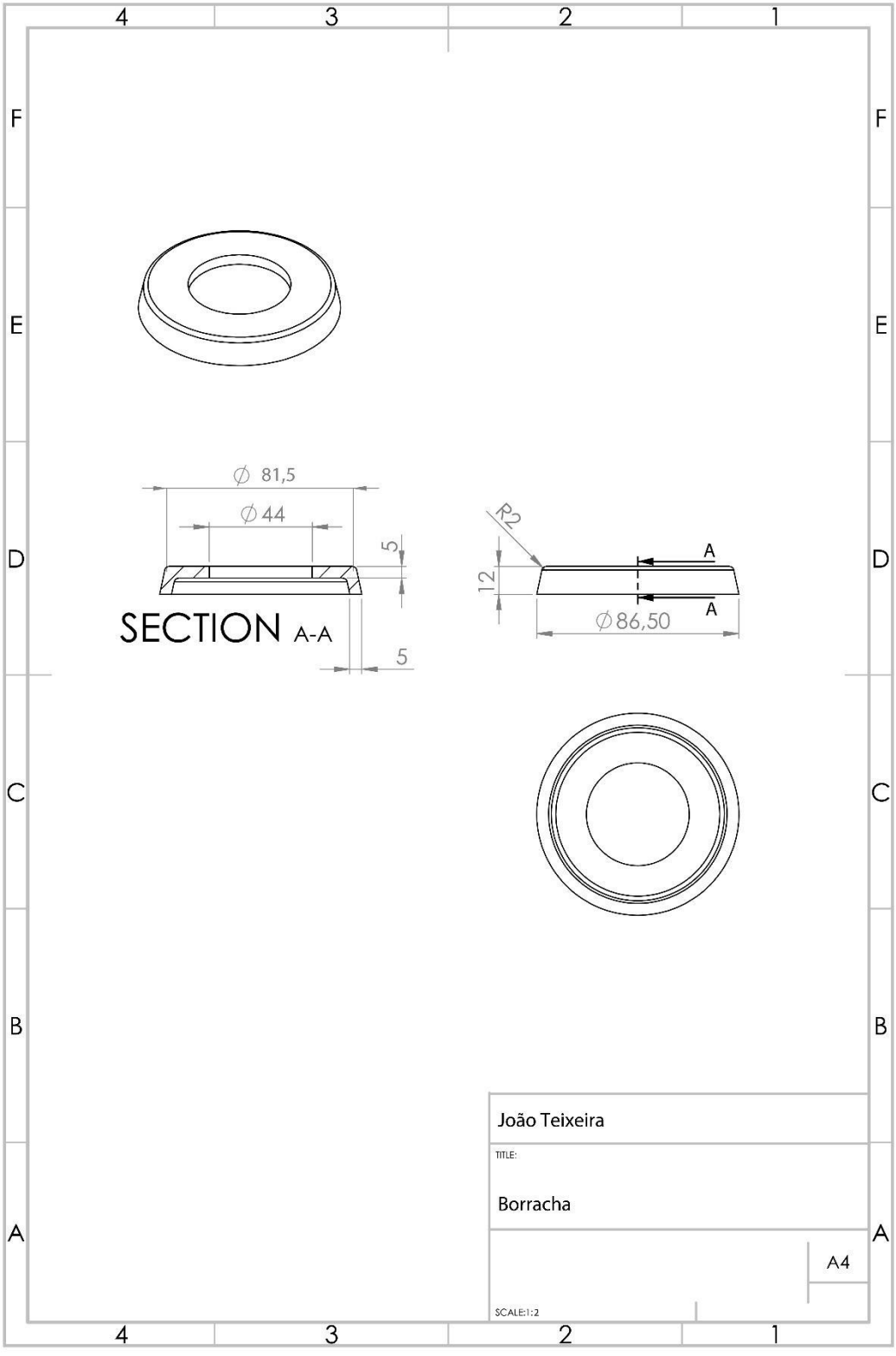
———. 2018. "Introducing BOD2 ". Acedido a 2 de março de 2018 https://3dprinthuset.dk/3d-construction-printer/.

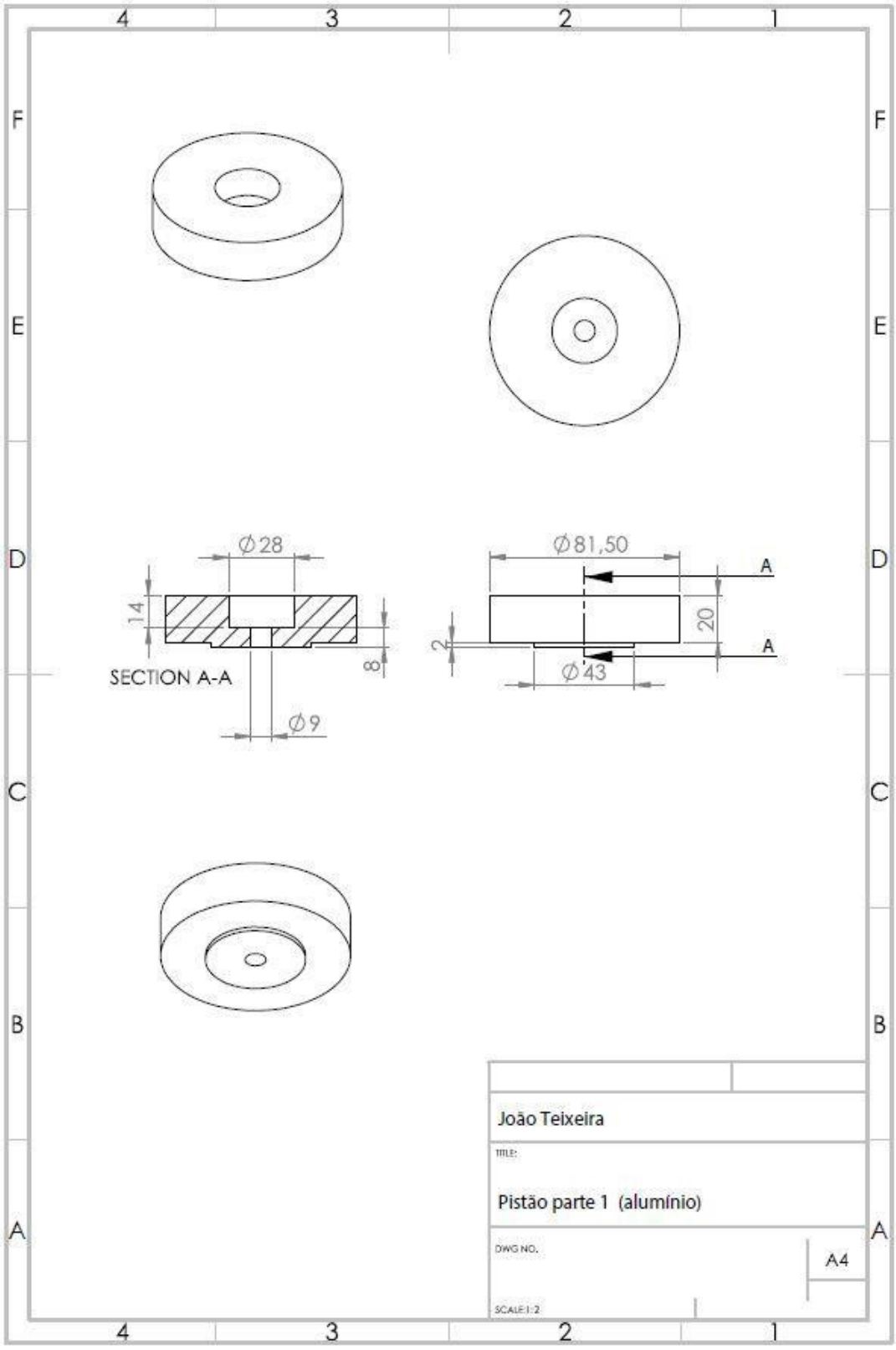
Punchbowl Media. 2016. "Meet The Kamermaker 3D printer". Acedido a 4 de janeiro de 2018 http://www.3dprinterworld.com/article/meet-kamermaker-3d-printer.
R. Gagne, M. Pigeon e P. C. Aitcin. "Deicer Salt Scaling Resistance of High Strength Concretes Made With Different Cements". *Special Publication* no. 126:185-200. Acedido a 14 de março de 2018 https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/2115.
ranchoavellanas.com. 2018a. "Charming Design Concrete Furniture Modern By Hocker Heinrich Must Haves". Acedido a 24 de abril de 2018 http://ranchoavellanas.com/7838/concrete-furniture-mesmerizing/charming-design-concrete-furniture-modern-by-hocker-heinrich-must-haves/.
———. 2018b. "Chic Idea Concrete Furniture Design Psicmuse Com". http://ranchoavellanas.com/7838/concrete-furniture-mesmerizing/chic-idea-concrete-furniture-design-psicmuse-com/.
Ribic, Rene. 2018. "BetAbram 3D House Printer #printinghouse". Youtube vídeo, 00:0035. Acedido a 26 de abril de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=nY1m7_mGJ3g.
RILEM, TC. 1999. "Permeability of concrete as a criterion of its durability Final report: Concrete durability-An approach towards performance testing". *Materials and Structures* no. 32:174-179.
Rudenko, Andrey. 2014a. "3D Printed Concrete Castle is Complete". Acedido a 7 de agosto de 2014. http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html.
———. 2014b. "First Test Run ". *3D Concrete House Printer*, 21 de abril de 2014 Acedido a 15 de fevereiro de 2018 http://www.totalkustom.com/news.html.
———. 2014c. "Rudenko's 3D Concrete Printer ". *3D Concrete House Printer*, 21 de abril de 2014 Acedido a 15 de fevereiro de 2018 http://www.totalkustom.com/news.html.
———. 2015. "3D Printed Concrete Castle". Youtube vídeo 00:06:06. Acedido a 14 de fevereiro de 2018 https://www.youtube.com/watch?time_continue=143&v=DQ5Elbvvr1M.
Rutkin, Aviva. 2014. "Watch as the world's first 3D-printed house goes up". *New Scientist* no. 221 (2960):24. Acedido a 4 de janeiro de 2018 http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262407914605297.
Scott, Clare. 2016. "Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days". *3DPRINT.COM*, 16 de junho Acedido a 5 de fevereiro de 2018 https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/.
Sculpteo. 2018. "Metal 3D Printing Technology: Binder Jetting". Acedido a 10 de setembro de 2018 https://www.sculpteo.com/en/materials/binder-jetting-material/.
Seaboost Artificial reefs. 2018. "Large scale 3D-printed artificial reefs to restore coral ecosystems". Youtube vídeo, 00:02:04. Acedido a 22 de maio de 2018 https://www.youtube.com/watch?time_continue=23&v=OdthKLFnIYo.
Silva, António Santos. 2013. "Adição de metacaulino em betão: efeitos sobre durabilidade ". Comunicação apresentada em Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade em Aveiro fevereiro de 2013 Acedido a 23 de maio de 2018 https://run.unl.pt/bitstream/10362/11209/1/Vargas_2013.pdf.
Simply Amsterdam. 2018. "Overhoeks". Acedido a 10 de setembro de 2018 http://www.simplyamsterdam.nl/Overhoeks.htm.
Stereotactil. 2015. "Minibuilders". vimeo vídeo 00:07:07. Publicado Vimeo. Acedido a 20 de janeiro de 2018 https://vimeo.com/97976677.
Subathra Devi, V. 2018. "Durability properties of multiple blended concrete". *Construction and Building Materials* no. 179:649-660. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181831122X.
Tengda, HuaShang. 2016. "This On-Site 3D Printed House Took Only 45 Days". *All3DP*, 17 de junho de 2016 Acedido a 26 de abril de 2018 https://all3dp.com/21776-2/.
TU/e. 2018a. "3DCP Projects". Acedido a 7 de fevereiro de 2018 https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/research-programs/structural-design/research/research-areas/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/3dcp-projects/.
———. 2018b. "About 3D Concrete Printing". Acedido a 7 de fevereiro de 2018 https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/research-programs/structural-design/research/research-areas/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/about-3d-concrete-printing/.

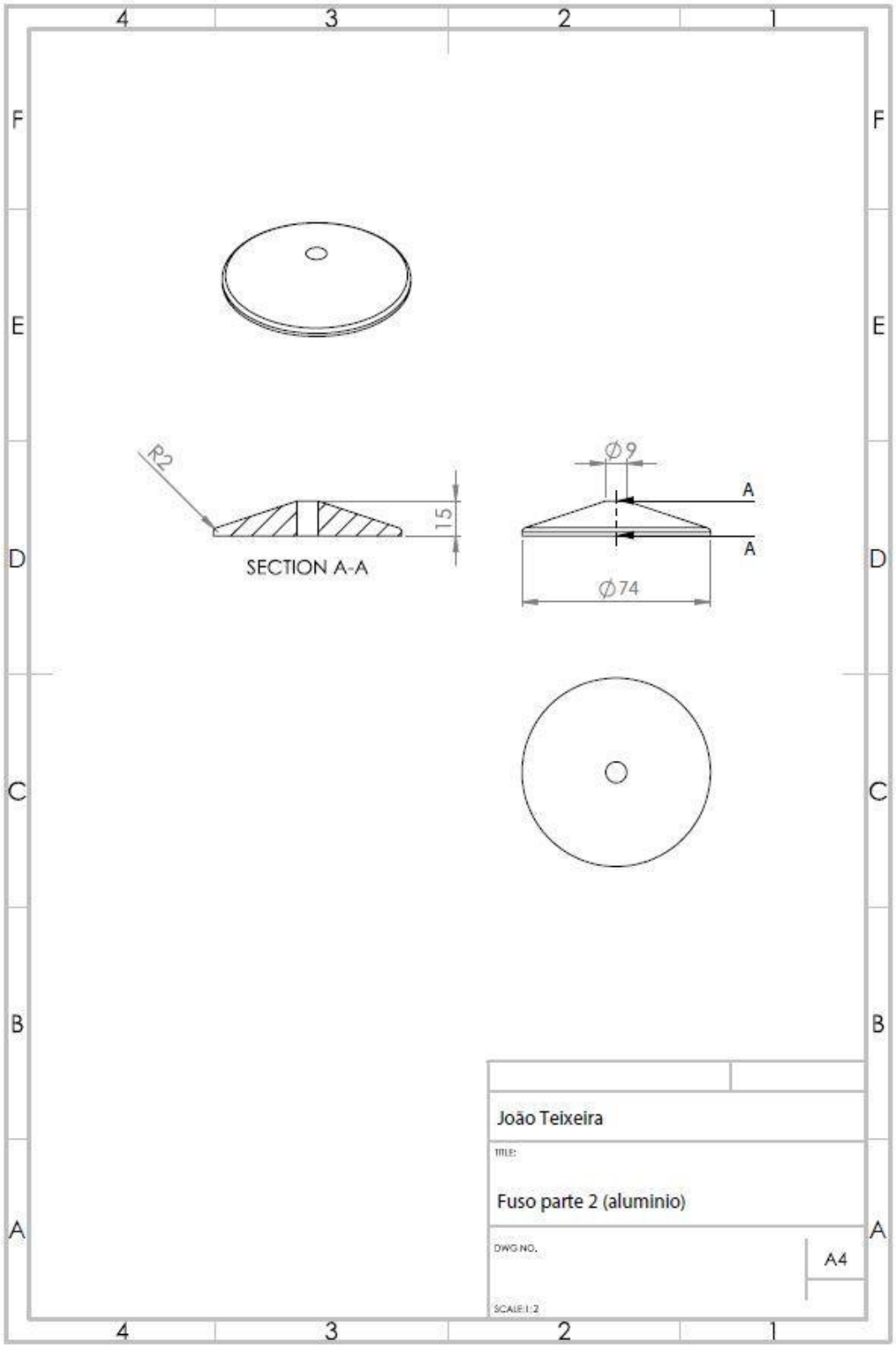
turkaramamotoru. 2014. "Goetheanum". Acedido a 7 de junho de 2018 https://www.turkaramamotoru.com/en/goetheanum-1020072.html.
Twentieth Century Society. 2018. "Building of the month". *Twentieth Century Society* abril de 2004. Acedido a 6 de maio de 2018 https://c20society.org.uk/botm/einstein-tower-potsdam/.
University., Loughborough. 2018a. "About Additive Manufacturing - Binder Jetting". Acedido a 10 de setembro de 2018 http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/.
———. 2018b. "About Additive Manufacturing - Material Extrusion". Acedido a 10 de setembro de 2018 http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/.
WASP, 3D. 2016. "Comando carica / Big Delta 12m". Youtube vídeo, 00:01:31. Acedido a 4 de março de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=D-6A1LbFi88.
———. 2017a. "BigDeltaWASP 12m". Youtube vídeo, 00:01:31. Acedido a 4 de março de 2018 https://www.youtube.com/watch?v=ZPUFKKcQ9ls.
WASP. 2017b. "3D printed houses for a renewed balance between environment and technology". Acedido a 30 de janeiro de 2017 http://www.wasproject.it/w/en/3d-printed-houses-for-a-renewed-balance-between-environment-and-technology/.
———. 2017c. "3D printed houses for a renewed balance between environment and technology". *WASP*, 30 de janeiro de 2017 Acedido a 8 de fevereiro de 2018 http://www.wasproject.it/w/en/3d-printed-houses-for-a-renewed-balance-between-environment-and-technology/.
———. 2017d. "The First 3D Printed House ". Acedido a 30 de janeiro de 2017 http://www.wasproject.it/w/en/3d-printing/bigdeltawasp-12m/.
———. 2017e. "Maker Economy Starter Kit". Acedido a 30 de janeiro de 2017 http://www.wasproject.it/w/en/3d-printers-projects/maker-economy-starter-kit/.
Waterloo, University of. 2016. "Winsun". *Future of Construction*, 6 de dezembro de 2016. Acedido a 24 de abril de 2018 https://futureofconstruction.org/case/winsun/.
Weng, Yiwei, Mingyang Li, Ming Jen Tan e Shunzhi Qian. 2018. "Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model". *Construction and Building Materials* no. 163:600-610. Acedido a 4 de janeiro de 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817325175.
www.goetheanum.org. 2005. "First Goetheanum.jpg". *Wikimedia Commons*, 27 de dezembro de 2005 Acedido a 7 de junho de 2018 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_Goetheanum.jpg.
XtreeE | the large scale 3D. 2017. "Rexcor Artificial Reef ". Acedido a 5 de maio de 2018 http://www.xtreee.eu/project-rexcor-artificial-reef/.
———. 2018a. "Facade Panels Prototypes". Acedido a 5 de maio de 2018 http://www.xtreee.eu/project-facade-panels/.
———. 2018b. "Home ". Acedido a 4 de fevereiro de 2018 https://www.xtreee.eu/.
Yingchuang Building Technique, （Shanghai）Co.Ltd. (WinSun). 2017. "Company Profile ". Acedido a 27 de janeiro de 2018 http://www.winsun3d.com/En/About/#abM4.

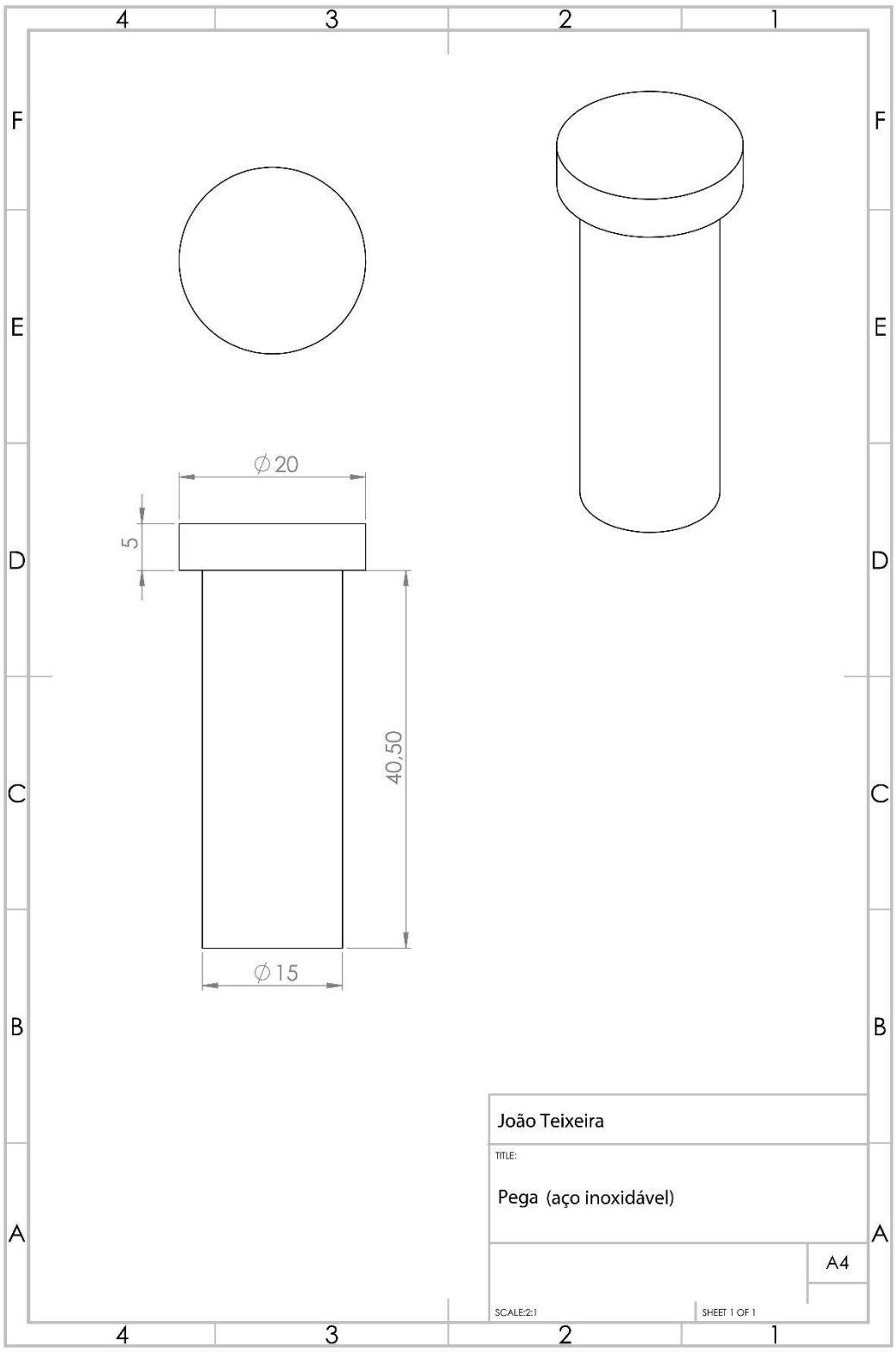
8. Anexos

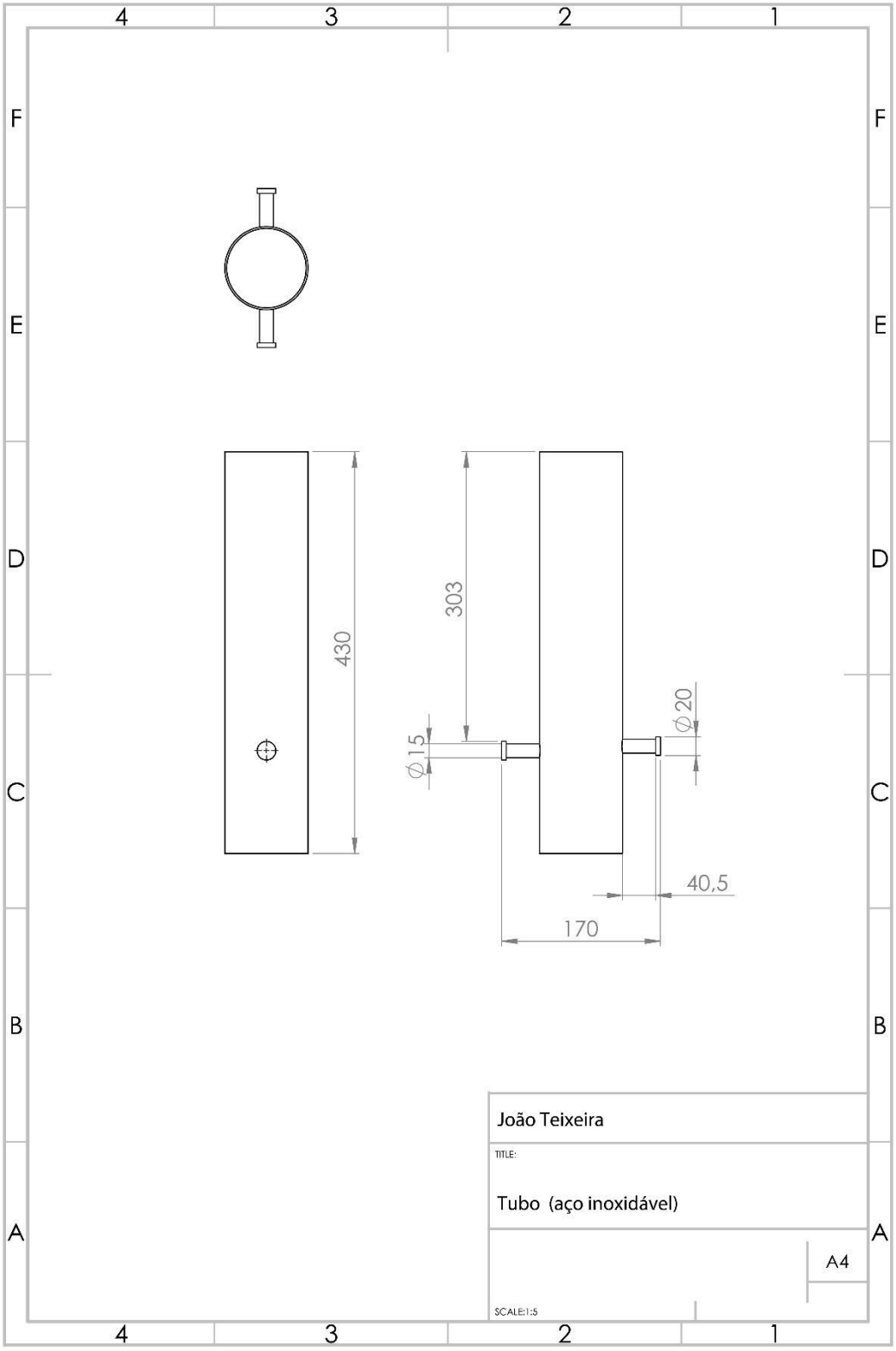
Anexo A - Desenhos técnicos


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
∅ 81,5
∅ 44
5
SECTION A-A
5
R2
12
A
A
∅ 86,50
João Teixeira
TITLE:
Borracha
A4
SCALE:1:2


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
Ø28
14
8
SECTION A-A
Ø9
Ø81,50
A
A
20
2
Ø43
João Teixeira
TITLE:
Pistão parte 1 (alumínio)
DWG NO.
A4
SCALE:1:2


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
R2
15
SECTION A-A
Ø9
A
A
Ø74
João Teixeira
TITLE:
Fuso parte 2 (aluminio)
DWG NO.
A4
SCALE:1:2


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
∅20
5
40,50
∅15
João Teixeira
TITLE:
Pega (aço inoxidável)
A4
SCALE:2:1
SHEET 1 OF 1


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
430
303
Ø15
Ø20
40,5
170
João Teixeira
TITLE:
Tubo (aço inoxidável)
A4
SCALE:1:5

Anexo B – Medição dos filamentos

Filamento	Nº	Data	Bocal	Altura	L1	L2	L3	Comprimento	Argamassa
A	1	12/04/2018	40	30	130	205	150	28	1
B	2	12/04/2018	40	30	83	104	112	250	1
C	3	12/04/2018	40	30	76	108	100	250	1
D	4	12/04/2018	40	30	86	121	98	270	1
E	5	12/04/2018	40	30	61	79	105	260	1
F	7	12/04/2018	40	30	64	89	89	240	1
G	8	12/04/2018	40	30	72	86	84	260	1
H	9	12/04/2018	40	30	81	82	81	250	1
I	10	12/04/2018	40	30	66	84	71	250	1
A1	11	03/05/2018	23	20	58	88	91	230	1
A2	12	03/05/2018	23	20	76	116	90	250	1
A3	13	03/05/2018	23	20	71	91	74	270	1
A4	14	03/05/2018	23	20	61	78	79	250	1
A5	15	03/05/2018	23	20	48	53	54	270	1
A6	16	03/05/2018	23	20	43	48	49	270	1
B1	17	08/05/2018	23	20	42	53	54	230	2
B2	18	08/05/2018	23	20	43	48	49	240	2
B3	19	08/05/2018	23	20	41	46	38	230	2
B4	20	08/05/2018	23	20	36,5	48	58	250	2
B5	21	08/05/2018	23	20	39	33	42	270	2
B6	22	08/05/2018	23	20	36	33	30	250	2
B7	23	08/05/2018	23	20	33	33	47	240	2
B8	24	08/05/2018	23	20	37	32	32	250	2
B10	26	08/05/2018	23	20	29	28	29	92	2

Anexo C - Poster MDA

MDA 2018

5 - 6 JULY 2018

FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF PORTO
PORTO - PORTUGAL

3D Printing with Extrusion of Cementitious materials

João Teixeira[1*], Bárbara Rangel[1, 2], Jorge Lino[1, 3], Rui Neto[3] and Sandra Nunes[2]
[1] Master in Product and Industrial Design, University of Porto, Portugal
[2] CONSTRUCT, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal
[3] INEGI / Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal
* Contact: jhildtex@gmail.com

Introduction

In recent years, numerous projects have promoted the development of 3D printing using cementitious materials that started in 2004 with Dr. Behrokh Koshenevis, creator of Contour Crafting. His work inspired companies such as BetAbram, CyBe and universities such as Loughborough and Eindhoven.

In all these cases mortars have been developed and adapted to the printing systems, which vary in terms of the structure of the printer, extrusion mode and method of transporting the material from the mixer to the outlet nozzle.

For printing it is necessary that the mortar fulfills some requirements, and typical constituent materials include: portland cement; fine siliceous aggregates; limestone powder; rheological modifiers; and fibres [1].

Material

This work uses 3 mortars with the composition indicated in Table 1. Mortar B and C were reinforced with 2% steel fibres; 6 mm length and 0,175 mm diameter (Mortar B), and 13 mm length and 0,2 mm diameter (Mortar C).

Mortar	A
Cement	23.6%
Limestone	13.5%
Metakaolin	7.8%
Sand	44%
Water	10.4%
Superplasticizer	0.7%

Tab. 1 - Relative proportions of materials in the mortar mixtures.

Evolution of mortar properties

To determine the time for the material to achieve the optimum properties for printing, two types of tests were performed: slump test (Fig. 2) and filament printing over time (Figs. 3, 4 and 5), similar to the work of Ma, Li, and Wang [2].

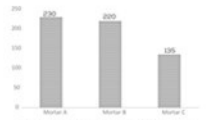


Fig. 2 - Spread flow diameter, 3 minutes after mixing (mm).

Fig. 3 - Widths of the filaments presented in Figures 4 and 5.

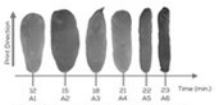


Fig. 4 - Evolution of the width of filaments printed with mortar A.

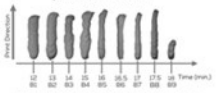
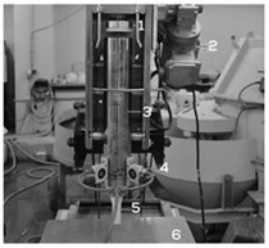


Fig. 5 - Evolution of the width of filaments printed with mortar B.

Extrusion System

In this system (Fig. 1) the material is casted inside a cylinder and forced out of the nozzle by the pressure exerted by a mechanically driven piston. The body of the extruder (cylinder) has a capacity of approximately 5 kg of material, which enables the printing of test specimens for mechanical tests or small parts. Two pneumatic actuators were installed next to the nozzle, which vibrates the material.



1 - Piston
2 - Motor
3 - Extruser Body
4 - Pneumatic Actuator
5 - Nozzle
6 - Printing Table

Fig. 1 - Extrusion System.

Mechanical Properties

The use of 3D printing usually results in the loss of isotropy of the material, so the strength of the material varies with the test direction, depending on the printing conditions. To evaluate the potential loss of strength in the most unfavourable direction, molded reference specimens, as well as printed test specimens, were tested.

Bending and compression strength tests, were performed, at least 2 samples, according to NP EN 196-1: 2005. Figure 6 presents the average results obtained with these tests.

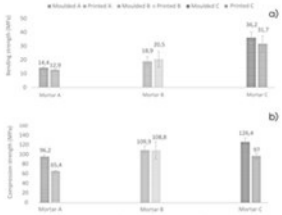
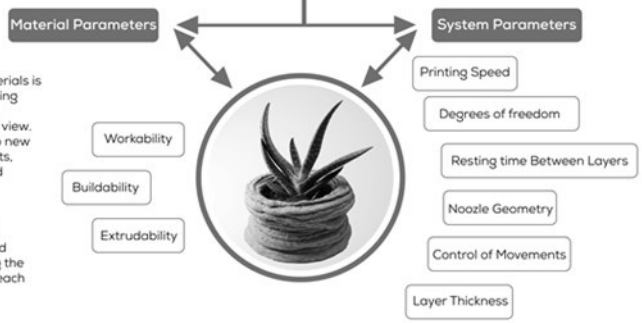


Fig. 6 - Average tests results: a) bending, and b) compression strength.



Requirements for 3D Printing

Fig. 7 - Factors influencing 3D printing quality.

Conclusions

3D printing with cementitious materials is a technology in strong growth, having enormous advantages from the ecological and economical point of view. However, it is necessary to develop new materials with specific requirements, such as, workability, buildabilty and extrudability.

One of its great advantages is the printing of free and organic forms, eliminating the need of moulds, and having a great potencial for saving the amount of material necessary for each application.

In terms of product design this tecnhology has a social and economic impact allowing ordinary people to materialize their own design ideas.

References

[1] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, "Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing," Virtual and Physical Prototyping, vol. 11, no. 3, pp. 209-25, / 2016.

[2] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, "Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion-based 3D printing," Construction and Building Materials, vol. 162, pp. 613-627, 2018/02/20/ 2018.

Akcnowledgments

Authors gratefully acknowledge the funding of Project NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanced by Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), through Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).
Project POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Institute for Structural and Construction R & D - financed by Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional through COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and national funds through Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P.

Anexo D – Artigo CONSTRUÇÃO 2018

IMPRESSÃO 3D COM EXTRUSÃO DE MATERIAL CIMENTÍCIO

João Teixeira[1], Bárbara Rangel [1,2], Jorge Alves Lino [1,3], Rui Neto[3] e Sandra Nunes[2]

1: Mestrado em Design Industrial e de Produto
Faculdade de Engenharia / Faculdade de Belas Artes
Universidade do Porto
e-mail: up201601412@fe.up.pt

2: CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
e-mail: {brangel, snunes}@fe.up.pt

3: INEGI
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
e-mail: {falves, rjn}@fe.up.pt

Palavras-chave: Construção, Extrusão, Impressão 3D, Materiais cimentícios.

Resumo. *A tecnologia de impressão 3D é atualmente a tecnologia de fabricação em maior expansão a nível mundial. Ao produzir peças através da deposição incremental de material somente onde este é necessário permite, potencialmente, obter qualquer forma sem desperdício de material e sem recurso a moldes. Estes argumentos estão a transformar as mais diversas áreas como o design industrial e de produto ou a medicina. Na indústria da construção, o uso da fabricação aditiva apresenta um enorme potencial para a conceção de soluções mais adaptadas e otimizadas, promovendo conceitos de sustentabilidade, assim como de liberdade formal.*

Nos últimos anos, têm surgido inúmeros projetos/empresas que visam implementar a impressão 3D, na construção civil, por via de extrusão de materiais cimentícios, como a Contour Crafting, BetAbram, Bruil, Wasp, entre outras. Por se dispensar o uso de cofragem, um dos aspetos críticos é o ajuste das propriedades do material no estado fresco às exigências da impressão 3D, vulgarmente designadas na literatura internacional por:"workability", "buildability" e "extrudability". Ou seja, é necessária uma consistência no estado fresco, que permita o transporte e extrusão do material, seguida de uma evolução rápida da resistência que permita a deposição de camadas sucessivas de material, sem deformação excessiva das camadas mas garantindo uma boa ligação entre elas.

No presente trabalho pretende-se explorar a impressão 3D, por via da extrusão, para a indústria da construção. A fase inicial do trabalho consistiu no desenvolvimento e caracterização das propriedades de diversas argamassas no estado fresco e da sua evolução ao longo das primeiras idades, tendo como objetivo identificar a argamassa ótima para o processo de impressão. Em seguida, procedeu-se ao fabrico de provetes de argamassa moldados e com recurso à impressão 3D, destinados à caracterização das propriedades mecânicas do material, no estado endurecido. Após a escolha da argamassa, foram realizados estudos formais com recurso a uma mesa giratória que resultou na impressão de um vaso.

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D é atualmente a tecnologia de fabricação em maior expansão. Presente nas mais diversas áreas: automobilismo, aeronáutica, exploração espacial, arte, medicina e mais recentemente na construção, com o aparecimento de tecnologias de extrusão de argamassas e betões (Hager, Golonka, e Putanowicz 2016). Este conceito baseado na deposição sucessiva de camadas de material, apresenta um enorme potencial para a construção em betão, eliminando a necessidade de uso de cofragem e promovendo conceitos de sustentabilidade, assim como de liberdade formal.

Nos últimos anos, inúmeros projetos promoveram o desenvolvimento desta tecnologia, começando em 2004 com o Dr. Behrokh Koshenevis criador da Contour Crafting, seguido de empresas como a Wasp, Bruil, BetAbram, CyBe e universidades como a de Loughborough e Eindhoven.

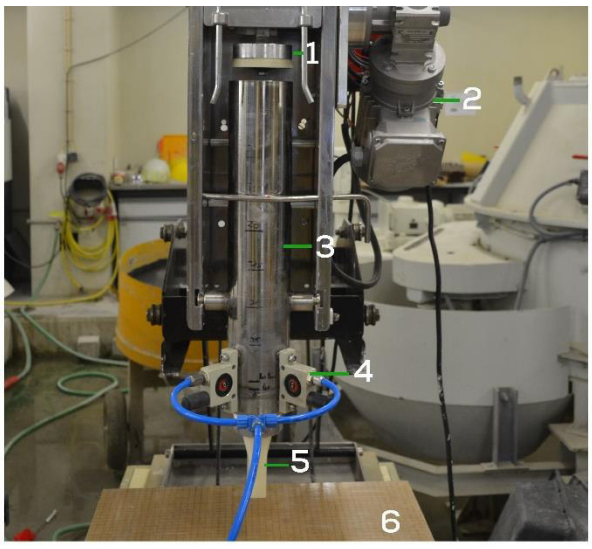
Em todos estes casos foram desenvolvidas misturas adaptadas aos sistemas de impressão utilizados, que variam em termos da estrutura da própria impressora, o método de transporte do material desde a amassadura até ao bocal de saída, tendo também alterações no modo de extrusão.

2. SISTEMA DE EXTRUSÃO

No presente trabalho foi utilizado um extrusor com um funcionamento semelhante ao de uma seringa. Neste sistema (Fig.1) o material é depositado no interior de um cilindro e forçado a sair pelo bocal através da pressão exercida por um pistão, acionado mecanicamente.

O corpo do extrusor (cilindro) tem capacidade para aproximadamente 5kg de material, quantidade que possibilita a impressão de provetes para ensaios mecânicos ou a impressão de pequenas peças. Junto ao bocal foram ainda instalados dois atuadores pneumáticos, que vibram o material junto à saída. O acoplamento do bocal ao extrusor é feito através de uma rosca que permite a troca de bocal com facilidade. Ao longo dos ensaios foram utilizados 3 tipos de bocais: dois de secção transversal circular, e com diâmetro de 15 e 23 mm; e um com secção transversal retangular com as dimensões de 15x35mm^2.

A maior desvantagem do sistema utilizado prende-se com o controlo manual dos movimentos da mesa de impressão (2 D, na horizontal) e do movimento vertical do corpo do extrusor. A falta de automatização dificulta a repetição das condições do ensaio (velocidade de deposição, altura da deposição, tempo de deposição e geometria da camada) e tem uma grande influência na qualidade do acabamento das peças.



1 - Pistão
2 - Motor
3 - Corpo
4 - Atuador Pneumático
5 - Bocal
6 - Mesa de impressão

Figura 1. Principais componentes do sistema de impressão.

3. DESENVOLVIMENTO DO MATERIAL

3.1. Requisitos de desempenho para impressão

Para além da grande durabilidade, os materiais cimentícios podem exibir resistências elevadas, no estado endurecido, e fluidez no estado fresco, propriedades que motivam o seu desenvolvimento para a inclusão em sistemas de impressão 3D (Bos et al. 2016).
Na impressão 3D a conceção do objeto é feita através da deposição sucessiva de camadas, logo o material necessita de trabalhabilidade para percorrer o caminho até ao bocal de saída do extrusor e de adquirir resistência suficiente, logo após a extrusão, para suportar o peso das camadas. Os requisitos habitualmente associados à "printability" do material são: "workability", "buildability", "extrudability" (Tab.1).

"Workability"	Refere-se à trabalhabilidade do material após o fim da amassadura, sendo a propriedade que afeta diretamente o seu transporte ao longo de todo o processo de impressão. Esta propriedade varia ao longo do tempo e é afetada por fatores ambientais como temperatura e humidade.	"Printability"
"Buildability"	Refere-se ao desenvolvimento da microestrutura do material e ganho de resistência ao longo das primeiras idades, que assegura o empilhamento sucessivo de camadas sem deformação excessiva, quanto melhor "buildability" tiver o material, menor será o risco de construções mais altas colapsarem.	
"Extrudability"	Este requisito relaciona-se com as características que asseguram a deposição em filamentos contínuos e estáveis, através de um bocal. Materiais com má "extrudability" originam bloqueios no sistema ou interrupções no filamento.	

Tabela 1. Requisitos para impressão 3D com materiais cimentícios (adaptado de (Ma, Li, e Wang 2018)).

3.2. Estudo da composição da argamassa

Apesar de já existir literatura vasta sobre a impressão 3D com materiais cimentícios, em geral, não são revelados muitos detalhes sobre a composição da argamassa utilizada. Bos, F., Wolfs, R., & Salet, T., (Bos et al. 2016) sugerem para materiais constituintes os seguintes:

- Cimento Portland (CEM I 52,5 R);
- Agregado Silicioso, com granulometria de 1mm de diâmetro;
- Fíler Calcário e aditivos para facilitar o bombeamento;
- Modificadores reológicos para obtenção de tixotropia na argamassa fresca;
- Pequenas quantidades de fibras de polipropileno para a redução de fissuras, devido a secagens precoces.

Na Tabela 2, apresentam-se características de algumas argamassas utilizadas para impressão, encontradas na literatura. Verifica-se que, em geral, são materiais que atingem resistências relativamente elevadas nas primeiras idades; os materiais finos são constituídos por uma mistura de cimento e outras adições pozolânicas; e para além do uso de superplastificantes é frequente o recurso a adjuvantes retardadores.

Material	Criador	Constituintes	Características	Ref.
Argamassa	CyBe	Cimento, areia; (…)	Resistência à compressão, de 25 MPa (1 dia); disponível em várias cores.	(CyBe Construction 2017b)
Argamassa	Lund University	Cimento; areia; cinzas volantes; sílica ativa, água; retardadores; superplastificante.	Resistência á compressão de 105 MPa e à tração de cerca de 13 MPa.	(Anell 2015)
Argamassa	Weng, Li, Tan, Qian.	Cimento; sílica ativa, areia de sílica, cinzas volantes, areia de rio, água, superplastificante.	A melhor composição, obtida com estes constituintes, atinge resistências à compressão de 60 MPa, e à flexão de 4,5 MPa (28 dias).	(Weng et al. 2018)
Argamassa	Hwang e Khoshnevis	Cimento; areia; água; superplastificante.	Resistência à compressão de aproximadamente 19 MPa (7 dias)	(Hwang e Khoshnevis 2004)

Tabela 2. Exemplos de alguns materiais cimentícios, utilizados em impressão.

3.3. Composição da argamassa para impressão

Tendo em conta a pesquisa anterior, as argamassas estudadas no presente trabalho são constituídas pelos seguintes materiais indicados na Tabela 3, onde se indicam também as proporções relativas nas quais estes materiais foram utilizados. A inclusão de materiais como o filer calcário e o metacaulino, para além de diminuírem a utilização de cimento cuja produção resulta em emissões de CO^2 para a atmosfera, melhoram o comportamento reológico [2], e contribuem para a diminuição da porosidade no material, afetando positivamente a durabilidade (Silva 2013).

Argamassa	A
Cimento (CEM I 42.5 R)	23,6%
Fíler Calcário	13,5%
Metacaulino	7,8%
Areia Fina	44%
Água	10,4 %
Superplastificante	0,7%

Tabela 3. Proporções relativas na composição da argamassa.

Neste trabalho foram estudadas 3 argamassas. A argamassa A é a indicada na Tabela 3. As restantes, argamassa B e C, tiveram a mesma composição, no entanto foram incluídas fibras metálicas com 6mm e 13 mm de comprimento, respetivamente. A inclusão destas fibras, nas misturas, ocupará 2% do volume total de cada argamassa. Na Tabela 4, apresentam-se as características das fibras metálicas utilizadas.

	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa específica (kg/m^3)	Resistência à tração (MPa)
Krampharex	6	0,175	7850	2100
Dramix	13	0,2	7850	2750

Tabela 4.Características das fibras metálicas utilizadas nas argamassas B e C.

3.3. Fatores que influenciam a impressão

Durante um processo de impressão 3D com material cimentício existem vários parâmetros que influenciam a qualidade de impressão, sendo eles a geometria da peça, as propriedades do material e as configurações da impressão, representados esquematicamente na Figura 2.

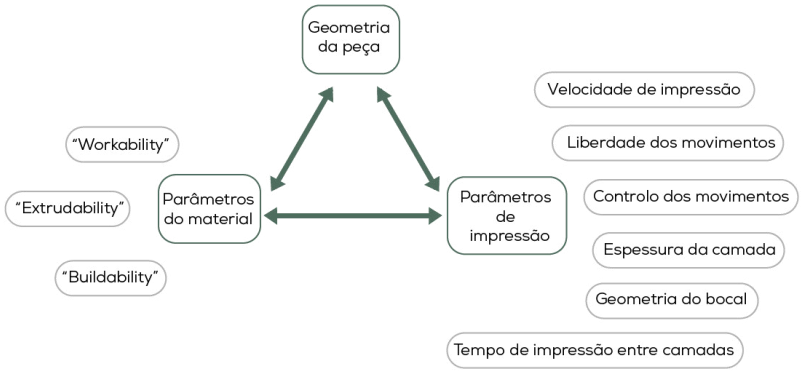


Figura 2. Fatores que influenciam a impressão (adaptado de (Ma, Li, e Wang 2018)).

O sistema de impressão utilizado neste trabalho proporciona a extrusão do material e a sua deposição em camadas, no entanto, não permite controlar com rigor vários fatores determinantes para a qualidade da peça (Fig. 2).

4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

4.1. Evolução das propriedades da argamassa ao longo do tempo

Para determinar o período no qual o material atinge as propriedades ótimas para impressão, "Printability", foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de espalhamento e impressão de filamentos ao longo do tempo, à semelhança do trabalho de Ma, Li, e Wang (Ma, Li, e Wang 2018).

4.1.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento consiste no enchimento de um molde tronco-cónico, com argamassa, semelhante ao molde da Figura 3. Após o enchimento do molde, este é levantado perpendicularmente à mesa na qual está assente, o material será então libertado, deformando-se na superfície da mesa. Quando o movimento parar são medidos dois diâmetros da área de espalhamento formada. A média destes dois diâmetros resulta no índice de deformabilidade da argamassa.

Figura 3. Molde tronco-cónico utilizado no ensaio de espalhamento.

Os ensaios de espalhamento foram realizados desde o minuto 3 até ao minuto 25 após o final da amassadura. O intervalo de tempo não foi previamente estipulado, ou seja, o tempo entre cada ensaio resulta do tempo de enchimento, limpeza da mesa, enchimento do molde e execução do ensaio.

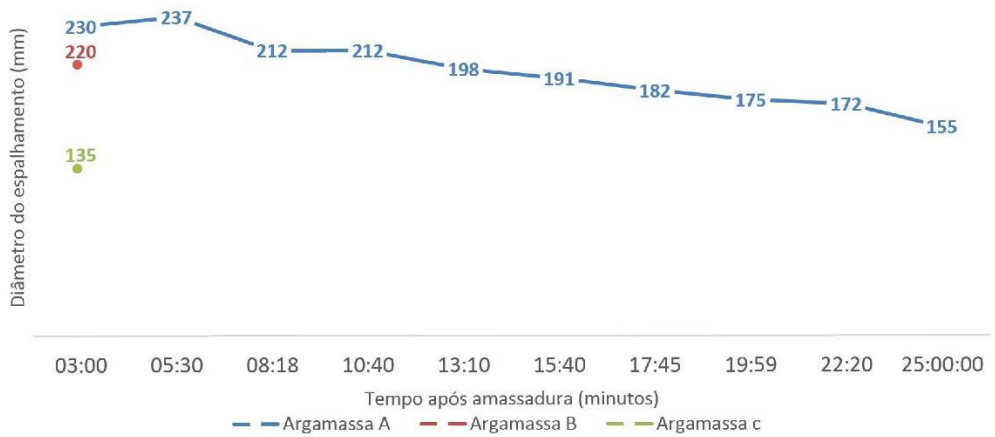


Figura 4. Resultados dos ensaios de espalhamento.

Na curva da Figura 4, estão representados os diâmetros de espalhamento da argamassa A ao longo do tempo. A diminuição do diâmetro está diretamente relacionada com a perda de fluidez do material. Podemos observar que existe um ligeiro aumento do diâmetro do espalhamento do 1º para o 2º ensaio, que pode ser justificado com o facto de o efeito do superplastificante se prolongar ainda ao longo dos primeiros minutos após o fim da amassadura.
Os resultados obtidos levam-nos a concluir que ao longo do tempo existe uma perda de fluidez, sendo que o material deixa de ser capaz de se deformar sem a ajuda de energia externa ao fim de cerca de 25 minutos.
Os valores apresentados com a cor vermelha e verde, correspondem aos resultados dos ensaios de espalhamento realizados, aos 3 minutos, com as argamassas B e C, respetivamente. A perda de fluidez foi de 4% na argamassa B e de 41% na argamassa C, comprovando que a inclusão de fibras e o seu comprimento tem influência na trabalhabilidade da argamassa.

4.1.2. Impressão de filamentos ao longo do tempo

Estes ensaios consistiram na impressão de filamentos ao longo do tempo, extrudidos pelo sistema de impressão apresentado anteriormente. A superfície de impressão utilizada ao longo destes ensaios foi um acetato, com baixo atrito superficial. A altura do bocal face à superfície de impressão foi definida com base na regra de que deve ser igual ou inferior à abertura do bocal (Tab. 5), promovendo a compactação das camadas que melhora a sua ligação (Bos et al. 2016; Ma, Li, e Wang 2018).

Bocal (diâmetro / altura / forma):	20mm / 20mm / circular
Argamassa:	A / B
Superfície:	Acetato

Tabela 5. Condições de impressão dos filamentos da Figura 5 e 6.

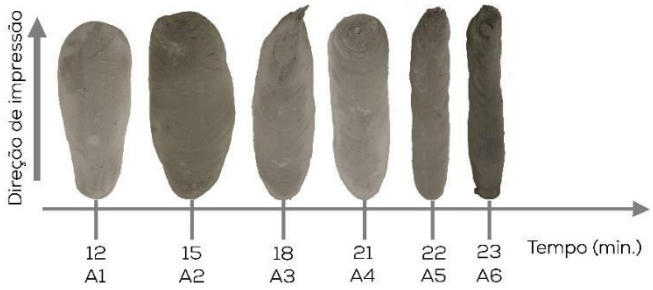


Figura 5. Evolução da largura dos filamentos impressos com argamassa A.

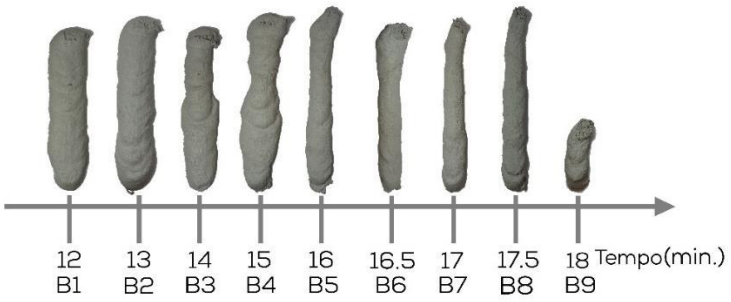


Figura 6. Evolução da largura dos filamentos impressos com argamassa B.

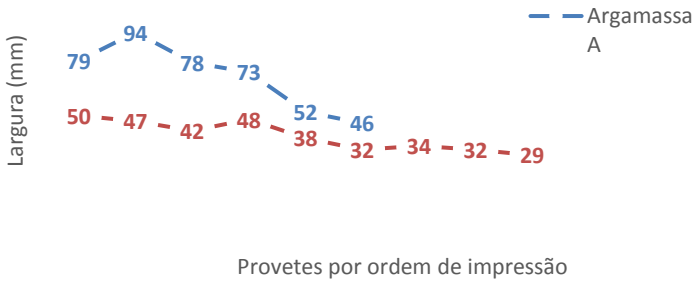


Figura 7.Larguras dos filamentos das Figuras 5 e 6.

Na análise deste ensaio podemos observar que a argamassa B, com 2% de fibras de 6mm, tem menor fluidez que a argamassa A, no mesmo período. Isto é claramente visível no provete A1, que apresenta uma deformação maior que o provete B1. É necessário recorrer aos provetes A5 e A6, impressos aos 22 e 23 minutos, respetivamente, para obter resultados semelhantes aos provetes B1 e B2 (Fig. 5, 6 e 7)

Podemos então concluir que a inclusão de fibras aumenta a "buildability" do material, sendo apenas necessários 12 minutos de espera, após amassadura, para iniciar a impressão com filamentos consistentes e uniformes.

4.2. Caracterização mecânica

A utilização da impressão 3D, resulta, normalmente, na perda da isotropia do material, ou seja, a resistência do material varia com a direção de ensaio, dependendo fortemente das condições da impressão (Doomen 2016). Para avaliar a potencial perda de resistência na direção mais desfavorável, foram ensaiados provetes de referência moldados com as dimensões 40x40x160 mm, assim como provetes impressos. Esses provetes foram submetidos a ensaios de flexão e compressão segundo a norma NP EN 196-1:2005, tendo sido ensaiados pelo menos 2 provetes para cada condição.

Para impressão dos provetes foi utilizado o bocal com secção transversal retangular com 35x15mm^2, a uma altura de 15 mm. Praticamente não houve tempo de espera entre a deposição do material das diferentes camadas. Todos os provetes, moldados e impressos, foram colocados em água e submetidos, a um período de cura de 28 dias, em ambiente saturado numa câmara climática, com temperatura e humidade controlada, 20 °C e 95%, respetivamente.

Antes do ensaio, os provetes foram cortados lateralmente para eliminar irregularidades superficiais decorrentes da impressão. Durante o ensaio a aplicação de carga foi efetuada na direção paralela ao plano de interface entre camadas, por se entender ser este o pior cenário em termos de solicitação.

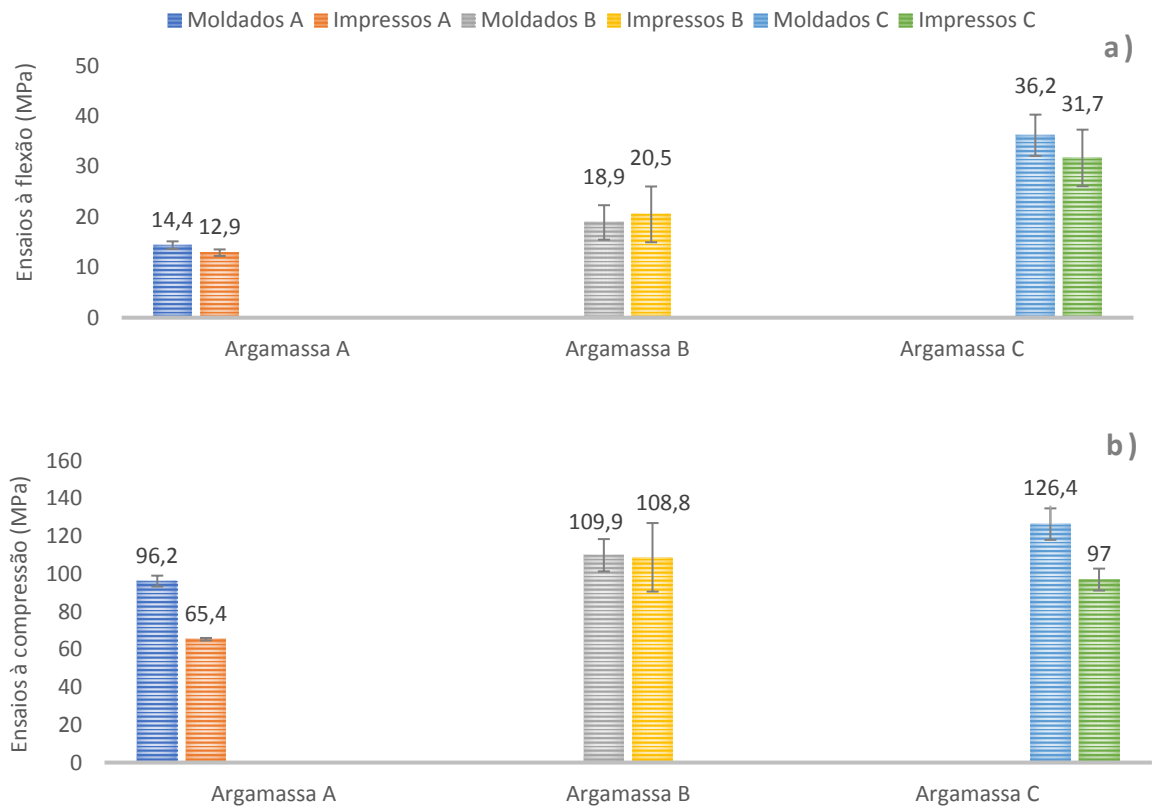


Figura 8. Média de resultados obtidos nos ensaios à: a) flexão e b) compressão.

Comparando os resultados dos provetes moldados, conclui-se que a inclusão de fibras na mistura aumentou consideravelmente as propriedades mecânicas. Na argamassa B, obteve-se um aumento de resistência à tração de 30%, e de 14% à compressão. Na argamassa C, obteve-se um aumento de resistência de 151% e 31%, à flexão e à compressão, respetivamente. Nos provetes impressos existe uma perda de resistência, tal como descrito na literatura [11, 16].
A argamassa A apresenta uma perda de 10% de resistência à flexão e de 32% à compressão. A argamassa B possuí resultados com menor discrepância entre impressos e moldados, tendo ganhos de resistência de 8% à flexão e perdas de 1% à compressão. Por último, temos a argamassa C, tem perdas de 12% à flexão e de 23% à compressão. Neste caso, a diferença entre provetes moldados e impressos, pode ser justificada com a perda de trabalhabilidade da mistura, que poderá ter resultado numa pior ligação entre camadas. Pode-se ainda concluir que a inclusão de fibras, junto com uma boa trabalhabilidade da argamassa, pode contribuir para uma melhor ligação entre camadas, contrariando a perda de resistência nos provetes impressos (Fig. 8).

5. PEÇAS IMPRESSAS

5.1. Vaso

Tendo analisado as 3 composições de argamassas, decidiu-se comprovar a "printabilty" da argamassa B, com a impressão de uma peça (vaso). A escolha desta argamassa deve-se ao facto de apresentar resistências à compressão e flexão superiores à da argamassa A, e por apresentar melhores resultados de impressão nos filamentos da Figura 6. A argamassa C não foi utilizada devido ao comprimento das fibras ser demasiado elevado para a abertura do bocal de 15 mm, o que poderia resultar em entupimentos.
Para o vaso ser impresso foi adaptado ao sistema uma mesa giratória, sobre a mesa inicial, que possibilitou a impressão da forma cilíndrica do vaso (Fig. 9). Algumas das camadas apresentam deformações devido aos movimentos irregulares proporcionados pela mesa de impressão manual. As características principais do processo de fabrico encontram-se

indicadas na Tabela 6.

Bocal (abertura / altura / geometria):	15mm / 10mm / redondo
Superfície:	Acetato
Altura da peça	110 mm
Número de camadas:	12
Diâmetro (inferior / superior)	153/157 mm

Tabela 5. Detalhes de impressão do vaso da Figura 9.

Figura 9. Processo de impressão do vaso com a argamassa B e contexto funcional, respetivamente.

5.2. Considerações finais

As propriedades do material conferem ao produto um tempo de vida útil elevado, tendo resistência suficiente para suportar impactos assim como o desgaste decorrente da função prevista. A incorporação de resíduos industriais em betões tem vindo a ser estudada na FEUP e, numa fase posterior desta investigação, será também considerada a sua inclusão nos materiais cimentícios destinados à impressão 3D. Outro aspeto relevante que interessa investigar em trabalhos futuros é a capacidade de reciclagem destes produtos no respetivo "fim de vida", indo ao encontro do conceito de Economia Circular que assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia.

6. CONCLUSÕES

- A impressão 3D é uma tecnologia em forte crescimento e com enormes vantagens do ponto de vista ecológico e económico. No entanto, é necessário o desenvolvimento de argamassas com propriedades específicas de "workability", "buildabilty" e "extrudability", o que propicia o aparecimento de novos materiais para a construção.
- Neste trabalho desenvolveu-se uma formulação de argamassa com propriedades adequadas para a impressão 3D, tendo-se produzido provetes para caracterização de propriedades mecânicas, que permitiram selecionar a melhor formulação para a impressão de uma pequena peça demonstrativa de validação desta tecnologia para o setor da construção civil.
- Uma das maiores vantagens deste processo é a impressão de formas livres e orgânicas sem recurso a cofragem, que reduz drasticamente o preço final da construção assim como o desperdício de materiais.
- Um dos problemas deste processo de fabrico pode ser a perda de isotropia do material, que deverá ser bem caracterizada e contabilizada ao nível do projeto de estruturas com a técnica de impressão 3D.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech -

Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e ao Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

REFERÊNCIAS

[1] I. Hager, A. Golonka, and R. Putanowicz, "3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?," *Procedia Engineering,* vol. 151, no. Supplement C, pp. 292-299, 2016/01/01/ 2016.

[2] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, "Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing," *Virtual and Physical Prototyping,* vol. 11, no. 3, pp. 209-25, / 2016.

[3] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, "Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing," *Construction and Building Materials,* vol. 162, pp. 613-627, 2018/02/20/ 2018.

[4] CyBe Construction. (2017, 2 de fevereiro de 2018). *CyBe Mortar*. Available: https://www.cybe.eu/cybemortar/

[5] L. H. Anell, "Concrete 3D printer," Master Master Division of Machine Design, Department of Design Science,Faculty of Engineering LTH Lund University 2015.

[6] Y. Weng, M. Li, M. J. Tan, and S. Qian, "Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model," *Construction and Building Materials,* vol. 163, pp. 600-610, 2/28/ 2018.

[7] D. Hwang and B. Khoshnevis, "Concrete wall fabrication by contour crafting," in *21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea*, 2004.

[8] A. S. Silva, "Adição de metacaulino em betão: efeitos sobre durabilidade " presented at the Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade Aveiro fevereiro de 2013 2013. Available: https://run.unl.pt/bitstream/10362/11209/1/Vargas_2013.pdf

[9] C. C. M. Doomen, "The Effect of Layered Manufacturing on the Strength Properties of Printable Concrete," Eindhoven University of Technology, 2016.