

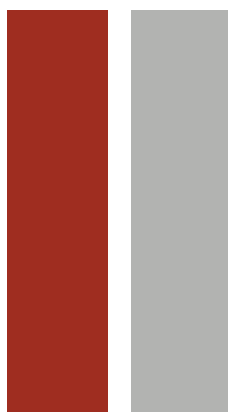
MESTRADO
DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO

Impressão 3D com terra crua: **A resignificação da aplicação do solo na** **arquitetura e no design contemporâneo**

Ana Luisa Rodrigues Guimarães

M

2024



MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutor Jorge Lino Alves

PROFESSOR CATEDRÁTICO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutora Bárbara Rangel Carvalho

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutor Leonardo Santana

PESQUISADOR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL)

19

21 OUTUBRO 2024

MESTRE Ana Luisa Rodrigues Guimarães
MDIP/164



Universidade do Porto
Faculdade de Belas Artes
Faculdade de Engenharia

Ana Luisa Rodrigues Guimarães

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

Coorientador: Doutor Márcio Albuquerque Buson
Professor do Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de Brasília

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



Porto,
2024

Agradecimentos

Gostaria inicialmente de agradecer à orientadora, professora Dra. Bárbara Rangel, pelo compartilhamento de conhecimento e orientação fundamental para o desenvolvimento desta investigação. Aos coorientadores Dr. Márcio Albuquerque Buson e Me. João Teixeira, pelo apoio e direcionamento ao decorrer da produção científica.

Agradeço em especial aos meus pais Maria da Graça Guimarães e Ieder Silva, aos meus irmãos e à Lulu Laika, pelo incentivo e apoio fornecido durante todo o processo. Ao Augusto Zambello, pelo suporte emocional, encorajamento constante e conselhos essenciais.

À engenheira Me. Paula Cristina Silva e ao engenheiro Me. António Eduardo Costa, pela disponibilidade e auxílio durante os ensaios mecânicos e de absorção de água. Aos pesquisadores do laboratório DIGI FEUP, Me. Manuel Jesus e Me. João Teixeira, pelo apoio durante o processo de impressão 3D. À Me. Mayra Deberg e a Juana Stauffer, pela amizade, compartilhamento de conhecimento e suporte na produção de fotografias.

À Universidade do Porto e a todas as instituições que auxiliaram de forma direta ou indireta o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

A indústria 4.0 está se inserindo no setor da construção civil através da impressão 3D com uso de materiais cimentícios. Todavia, observa-se que a aplicação deste material aumenta as emissões de gases poluentes, como o CO₂. Decorrente a este fator, uma nova tendência do mercado visa reduzir o uso de materiais poluentes. Assim, em resposta a esta demanda surge o resgate da aplicação de um material ancestral e sustentável, a terra crua. O emprego deste material nas novas tecnologias de produção é recente, de modo a necessitar investigações sobre o seu potencial.

A terra crua caracteriza-se como um material de baixo impacto ambiental e abundante na natureza, de forma a ser empregue em diversas construções históricas. Com base neste conhecimento, a presente investigação tem como objetivo compreender a capacidade de extrusão e de repelência à água de uma argamassa à base de terra, destinada à impressão 3D.

Inicialmente para atingir o propósito do estudo considerou-se uma metodologia multidisciplinar, uma vasta análise do mercado e de referências bibliográficas, de forma a fundamentar o desenvolvimento de um plano de investigação. Com isso, foram realizados ensaios laboratoriais para a validação de uma composição adequada à fabricação aditiva, sendo estes: capacidade de extrusão e construção, teste de estabilidade, teste de fissuração por retração, estudo estético, ensaios mecânicos (flexão e compressão) e de absorção de água por imersão parcial. Posterior a seleção da composição com melhor resposta aos testes, aplicou-se a mistura em um produto (mobiliário urbano), de modo a validar o seu uso na impressão 3D em grande e pequena escala.

A composição demonstrou o potencial de aplicação de argamassas à base de terra no setor da construção, no entanto mais estudos e melhoramentos quanto a sua repelência à água são necessários. Deste modo, a contribuição científica e tecnológica presente na investigação é a disposição de uma alternativa de material mais sustentável, com potencial de redução do impacto ambiental presente na construção civil. Assim, a pesquisa enfatiza a importância de estudos mais aprofundados de caracterização e de desempenho ao longo da vida útil do material, bem como a busca de materiais mais ecológicos e circulares com destino ao setor da construção.

Palavra-chave: Impressão 3D na construção, design, argamassa, terra crua.

ABSTRACT

Industry 4.0 is entering the construction sector through 3D printing using cementitious materials, but it has been observed that the use of this material increases emissions of polluting gases such as CO₂. In line with this, a new market trend aims to reduce the use of polluting materials. In response to this demand, the use of an ancestral and sustainable material, raw earth, has been revived. The use of this material in new production technologies is recent, so research into its potential is needed.

Raw earth is characterised as a material with a low environmental impact and abundant in nature, so it can be used in a variety of historical constructions. Based on this knowledge, this research aims to understand the extrusion capacity and water repellency of an earth-based mortar for 3D printing.

Initially, in order to achieve the purpose of the study, a multidisciplinary methodology was considered, as well as a vast analysis of the market and bibliographical references, in order to support the development of a research plan. Laboratory tests were then carried out to validate a composition suitable for additive manufacturing: extrusion and construction capacity, stability test, shrinkage cracking test, aesthetic study, mechanical tests (bending and compression) and partial immersion water absorption. After selecting the composition with the best response to the tests, the mixture was applied to a product (street furniture) in order to validate its use in large and small-scale 3D printing.

The composition demonstrated the potential for earth-based mortars to be used in the construction sector, but further studies and improvements in terms of their water repellency are needed. Thus, the scientific and technological contribution of this research is the provision of a more sustainable material alternative, with the potential to reduce the environmental impact of construction. The research therefore emphasises the importance of more in-depth characterisation and performance studies throughout the material's useful life, as well as the search for more ecological and circular materials for the construction sector.

Keyword: 3D printing in construction, design, mortar, raw earth.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1		19
1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contexto	20
1.2	Pertinência do estudo	21
1.3	Problema da pesquisa	22
1.4	Objetivos	23
1.5	Metodologia	23
1.6	Resultados Esperados	24
CAPÍTULO 2		27
2	ESTADO DA ARTE	28
2.1	Introdução	28
2.2	Palavras-chave	31
2.3	Revisão bibliométrica	32
2.4	Desenvolvimento dos temas	34
2.4.1	Argamassa para impressão 3D	35
2.4.2	Argamassa para impressão 3D com terra crua	38
2.4.3	Construção com terra	45
2.4.4	Argamassa hidrofóbica	51
2.4.5	Argamassa com reutilização de material	52
2.5	Pesquisa de Mercado	54
2.6	Síntese do Capítulo	72
CAPÍTULO 3		75
3	CASO DE ESTUDO	76
3.1	Introdução	76

3.2	Pertinência do estudo	76
3.3	Enquadramento	77
3.4	Objetivos	77
3.5	Resultados a alcançar	77
3.6	Metodologia	77
3.7	Plano de investigação	79
3.7.1	Etapa 1	79
3.7.2	Etapa 2	105
3.7.3	Etapa 3	110
3.8	Seleção da composição	119
3.9	Etapa 4 - Desenvolvimento do produto	119
3.9.1	Conceito	120
3.9.2	Processo	120
3.9.3	Produto	125
3.9.4	Prototipagem (escala reduzida)	138
3.9.5	Produto final	139
CAPÍTULO 4		147
4	CONCLUSÃO	148
4.1	Resposta ao problema colocado	148
4.2	Objetivos propostos / resultados alcançados	148
4.3	Constrangimentos do processo	149
4.4	Desenvolvimentos futuros	149
REFERÊNCIAS		151
ANEXOS		163

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Esquema de exemplos de fabricação aditiva SLA (solidificação do material através de feixes de luz) e FDM (adaptação de Van Noort, 2012).	28
Figura 02 - Esquema para obtenção de um protótipo (adaptação de Neto & Soares, 2020, p. 54) (adaptação de Ribeiro, 2023)	29
Figura 03 – Modelo 3D do Pavilhão Radiolaria (Turner, 2009b).	30
Figura 04 – Primeira obra arquitetônica impressa em 3D (Turner, 2009b).	30
Figura 05 – TOVA, projeto impresso com aplicação da terra crua, desenvolvido pela WASP e IAAC (Severi, 2022).	31
Figura 06 – Gráfico dos autores do banco de dados: “3D printing, earth construction, material design”, desenvolvido no VOSviewer. Fonte: Autora.	32
Figura 07 – Gráfico da recorrência das palavras-chave do banco de dados: “3D printing, earth materials, cob”, desenvolvido no VOSviewer. Fonte: Autora.	34
Figura 08 – Bloco impresso com aplicação de cimento-sílica em 1997 por Joseph Pegna (Pegna, 1997).	35
Figura 09 – Diagrama de Venn com requisitos para impressão 3D.	37
Figura 10 – Desenho esquemático do teste Filament printing test (adaptação de G. Silva et al. (2022).	43
Figura 11 - Desenho esquemático do teste Cylinder stability test, adaptação do ensaio realizado por G. Silva et al. (2022).	43
Figura 12 - Desenho esquemático do teste Stacking test adaptação do ensaio realizado por G. Silva et al. (2022).	44
Figura 13 – Desenho esquemático do teste Evaluation of shrinkage cracking.	44
Figura 14 – Construção em Taipa (Mendes, 2006)	47
Figura 15 – Construção em BTC (Escrivanes, 2019)	47
Figura 16 – Construção em Cob (Coimbra, 2017).	48
Figura 17 – Produção de tijolos de Adobe (Torgal et al., 2009).	48
Figura 18 – Construção em Tabique (Olender, 2006).	49
Figura 19 – Produção de tijolo solo-cimento (Ferrari et al., 2014).	49
Figura 20 – Mistura de Kraftterra (Buson, 2009).	49
Figura 21 – Impressão realizada pela Solar Sinter (Etherington, 2011).	55
Figura 22 – Processo de impressão realizado pela Solar Sinter (Etherington, 2011).	55
Figura 23 – Casa Gaia (Chiusoli, 2018).	56
Figura 24 – Impressão 3D com uso de terra crua realizada pela WASP e IAAC (Chiusoli, 2018).	57
Figura 25 – Projeto TECLA (WASP & Mario Cucinella Architects, 2021).	58
Figura 26 – Projeto TOVA e uso do solo como matéria-prima para impressão 3D (Severi, 2022).	59

Figura 27 – Andrea Salvatori em meio a produção do “IKEBANA ROCK’N’ROLL (Chiusoli, 2019b).	59
Figura 28 – Pilar desenvolvido no Workshop Pylos (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2016).	60
Figura 29 – Projeto desenvolvido no programa TerraPerforma (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2017)	60
Figura 30 – Aberturas para janelas em projetos com impressão 3D, Openings in 3D printing with earth (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2020).	61
Figura 31 – Composição de fotos dos produtos desenvolvidos para o projeto GCODE.Clay,(Jay R., as cited in Fratello, 2016).	61
Figura 32 – Composição de imagens que descrevem o projeto Mud Frontiers: Part II(Emerging Objects, 2019).	62
Figura 33 – Processo de impressão do projeto Mud Frontiers: Part II (Emerging Objects, 2019).	62
Figura 34 – Composição de imagens que descrevem o projeto Casa Covida (Emerging Objects, 2020).	63
Figura 35 – Disposição dos tijolos Future Archeologies (Emerging Objects, 2022b).	63
Figura 36 – Divisória de ambiente em impressão 3D, Projeto HIVE, desenvolvido pela equipe da Universidade de Waterloo, foto feita por David Correa(Prieto, 2022)	64
Figura 37 – Processo de impressão 3D do projeto Soil Inks Ehsan Baharlou (Aouf, 2022).	64
Figura 38 – Pilar impresso com uso de materiais reciclados (Blast studio, 2020).	65
Figura 39 – Fachada do Pavilhão dos Emirados Árabes Unidos impresso em 3D (Aectual, 2022).	65
Figura 40 – Processo de impressão do projeto MARSHA da AI SpaceFactory reproduzida em (Walsh, 2019).	66
Figura 41 – Esquema de impressão 3D do projeto MARSHA (AI SpaceFactory, n.d.).	66
Figura 42 – Processo de empilhamento das seções impressas, Patrick Bedarf (Bedarf et al., 2023)	66
Figura 43 – Modelo impresso pela designer Elis Regina Ribeiro (Ribeiro, 2023).	67
Figura 44 – Protótipo desenvolvido com resíduos da construção pela designer Mayra Dberg Alencar (Alencar, 2023).	67
Figura 45 – Composição de figuras dos projetos analisados no Estado da Arte.	69
Figura 46 – Etapas do método MDD, adaptação de Karana et al. (2015).	78

Figura 47 – Terra crua utilizada.	79
Figura 48 – Pó de mármore utilizado.	80
Figura 49 – Cal hidráulica utilizada.	80
Figura 50 – Areia utilizada.	80
Figura 51 – Fibra de coco utilizada.	80
Figura 52 – Óleo de cozinha aplicado.	80
Figura 53 – Sílica utilizada.	80
Figura 54 – Conjunto de imagens do processo de obtenção da polpa de cacto.	81
Figura 55 – Equipamentos usados no processo de obtenção da argamassa.	81
Figura 56 – Composições de imagens retratando o teste de capacidade de extrusão.	82
Figura 57 – Ensaio de capacidade de construção.	83
Figura 58 – Composições de imagens retratando o teste de estabilidade do cilindro.	83
Figura 59 – Amostras desenvolvidas na Etapa 1.	84
Figura 60 – Amostras desenvolvidas na Etapa 1.	85
Figura 61 – Constituintes utilizados no Grupo 01.	86
Figura 62 – Constituintes utilizados no Grupo 02.	88
Figura 63– Constituintes utilizados no Grupo 03.	90
Figura 64 – Constituintes utilizados no Grupo 01 de misturas aprimoradas.	94
Figura 65 – Constituintes utilizados no Grupo 02 de misturas aprimoradas.	96
Figura 66 – Constituintes utilizados no Grupo 03 de misturas aprimoradas.	98
Figura 67 – Constituintes utilizados no Grupo 04 de misturas aprimoradas.	100
Figura 68 – Constituintes utilizados no Grupo 05 de misturas aprimoradas.	102
Figura 69 – Teste de impressão da composição TAPMCAR 4.5 na DELTA WASP 40100.	106
Figura 70 – Teste de impressão da composição TAPMCARF 5.1 na DELTA WASP 40100.	106
Figura 71 – Teste de impressão da composição TAPMCARFO 6.5 na DELTA WASP 40100.	107
Figura 72 – Fissuras apresentadas na impressão da composição TAPMCARFO 6.5.	107
Figura 73 – Teste de impressão da composição TAPMCARFCC 7.4 na DELTA WASP 40100.	108
Figura 74 – Teste de impressão da composição TAPMCARFS 8.3 na DELTA WASP 40100.	108
Figura 75 – Teste de impressão da composição TAPMCARFOSCC 9.1 na DELTA WASP 40100.	109
Figura 76 – Composição de imagens com os moldes dos provetes TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.	110
Figura 77 – Ensaio mecânico de flexão.	111

Figura 78 – Ensaio mecânico de flexão, mistura TAPMCAR 4.5.	111
Figura 79 – Ensaio mecânico de compressão.	111
Figura 80 – Ensaio mecânico de compressão, mistura TAPMCAR 4.5.	111
Figura 81 – Ensaio de absorção de água após decorrido 2h do teste.	116
Figura 82 – Ensaio de absorção de água após decorrer 24h do teste.	119
Figura 83 – Composição de imagens comparativas de abrigos; a) Caverna Swartkrans habitada por hominídeos (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024b); b) Casa vernacular tradicional Tolek (Franco, 2014); c) “Seção de um edifício parisiense, 1845, via biliotheque Nationale de France” (ArchDaily, 2021); d) Pessoa em situação de rua, foto de Marcos Santos/ USP imagens (Ministério dos direitos humanos e da cidadania - Governo Federal Brasil, 2023)	121
Figura 84 – Composição de imagens das cavernas; a) Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a); b) Kromdraai (Botha, 2024); c) Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024b).	122
Figura 85 – Referência ergonômica para atender ao ser humano (Neufert, 1998, p. 20).	123
Figura 86 – Casa Tova (Corazza, 2021)	124
Figura 87 – Composição de bancos presentes no mercado a) Banco Urbano BASO (STODIS, n.d.); b) Upper (Pereira & Oliveira, 2023); c) Banco Domino 02.440 (ZANO Mobiliário Urbano, n.d.); d) Buddy (miramondo, n.d.); e) BENCHES: S (Martinez, 2017); f) Banco Bloco Parque (microcubo, n.d.).	126
Figura 88 – Caverna Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a).	128
Figura 89 – Caverna Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a).	128
Figura 90 – Projeto Gaudism.AI (Giménez, 2023).	128
Figura 91 – Projeto Gaudism.AI (Giménez, n.d.)	128
Figura 92 – Escultura (Baharal, n.d.).	128
Figura 93 – Obra Desert X 2021 (Sarabia, 2021).	128
Figura 94 – Construção com terra (Baddad & Santosa, 2020)	128
Figura 95 – Impressão 3D com Adobe (IAAC, n.d.)	128
Figura 96 – Museu Nacional do Qatar (Tom Ferguson Photography & Crook, 2019)	128
Figura 97 – Impressão 3D de peça orgânica (MYCO-CLAY, 2024).	128
Figura 98 – Projeto Ceramic House (Studio RAP, 2022)	128
Figura 99 – Projeto New Delft Blue (Studio RAP, 2019)	128
Figura 100 – Projeto Planter Vase (IOUS Studio, 2022)	128
Figura 101 – Projeto 3D-Printed Exterior Wall (IOUS Studio, 2023)	128
Figura 102 – Projeto 3D-Printed Exterior Wall, impressão (IOUS Studio, 2023)	128
Figura 103 – Grutas de Mira de Aire (Grutas de Mira de Aire, 2024).	128

Figura 104 – Gruta de Benagil (ALGARVE Portugal Tourism Guide, 2014).	128
Figura 105 – Artesanato em impressão 3D (UNFOLD, 2009).	128
Figura 106 – Artesanato em impressão 3D (Moretti, 2016).	128
Figura 107 – Obra Transmitter, do escultor Richard Serra (2020).	128
Figura 108 – Mobiliário urbano desenvolvido pelo Local Colletive, com aplicação da técnica de taipa (Harrouk, 2021).	129
Figura 109 – Pavilhão Vara (Ellrichshausen, 2017).	129
Figura 110 – Elemento arquitetónico (Frearson, 2012).	129
Figura 111 – Escultura (Buzio, 2009).	129
Figura 112 – Mobiliário urbano The Golden Spiral (John Morgan Thomas Arquitetos paisagistas et al., 2018).	129
Figura 113 – Banco convexo R190-45 ° (amop synergies, n.d.).	129
Figura 114 – Mobiliário flexível (MOLO, n.d.)	129
Figura 115 – Mobiliário urbano (Carlos & Jacinta, n.d.).	129
Figura 116 – Mobiliário desenvolvido por Rotterdam studio The New Raw (Winston, 2019).	129
Figura 117 – Mobiliário desenvolvido por R3direct (Listek, 2022).	129
Figura 118 – Instalação criada por Rasem Kamal e Canyon Walls (Stouhi, 2019).	129
Figura 119 – HOUSE ZERO 3D, produzida por ICON e Lake I Flato Architects (Padla, 2022).	129
Figura 120 – Vista interna da Sauna Sazae, projetada por Kengo Kuma & Associates (Abdel, 2022).	129
Figura 121 – Projeto desenvolvido por Advanced Intelligent Construction Technology (Sher, 2021).	129
Figura 122 – Estudo da forma.	130
Figura 123 – Estudo da forma com esboços e maquetes manuais.	130
Figura 124 – Desenvolvimento da mistura para impressão 3D em grande escala.	131
Figura 125 – Desenvolvimento do protótipo da textura.	131
Figura 126 – Desenvolvimento da impressão 3D em grande escala.	132
Figura 127 – Textura escolhida para aplicação em projeto.	132
Figura 128 – Vista lateral esquerda da textura escolhida para aplicação.	133
Figura 129 – Vista lateral direita da textura escolhida para aplicação .	133
Figura 130 – Textura do material em modelação 3D.	134
Figura 131 – Perspectiva com inserção de cenário.	135
Figura 132 – Vista superior do projeto.	136
Figura 133 – Desenho técnico do projeto.	137
Figura 134 – Primeira tentativa de impressão do mobiliário em escala reduzida.	138

Figura 135– Primeiro dia de impressão do mobiliário em escala reduzida.	139
Figura 136 – Segundo dia de impressão do mobiliário em escala reduzida.	139
Figura 137 – Mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	140
Figura 138 – Mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	140
Figura 139 – Vista lateral do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	141
Figura 140 – Vista lateral do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	142
Figura 141 – Vista lateral do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	143
Figura 142 – Perspectiva do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	144
Figura 143 – Perspectiva do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.	145

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Comparação ambiental entre I3D com concreto e I3D com composição de cob (adaptação Alhumayani et al., 2020).	38
Gráfico 02 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 01.	87
Gráfico 03 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 02.	89
Gráfico 04 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 03.	91
Gráfico 05 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 01.	95
Gráfico 06 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 02.	97
Gráfico 07 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 03.	99
Gráfico 08 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 04.	101
Gráfico 09 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 05.	103
Gráfico 10 – Resistência à compressão dos provetes da composição TAPMCAR 4.5.	112
Gráfico 11 – Resistência à compressão dos provetes da composição TAPMCARF 5.1.	112
Gráfico 12 – Gráfico da diferença da massa em relação ao tempo.	115
Gráfico 13 – Gráfico do coeficiente de absorção de água.	118
Gráfico 14 – Gráfico de absorção de água das misturas com saturação durante o tempo.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relação entre material e impressora (responsabilidades na impressão), desenvolvido com base nas referências bibliográficas.	38
Tabela 02 – Quadro de materiais utilizados por Faleschini et al. (2023).	40
Tabela 03 – Composições de misturas de argamassa à base de terras para impressão 3D.	42
Tabela 04 – Resumo de técnicas de construção com terra crua e seus aspetos principais.	50
Tabela 05 – Materiais repelentes com aplicação na construção.	52
Tabela 06 – Síntese dos materiais reutilizados no setor da construção civil.	54
Tabela 07 – Síntese do mercado.	71
Tabela 08 – Misturas desenvolvidas do Grupo 01.	86
Tabela 09 – Misturas desenvolvidas do Grupo 02.	88
Tabela 10 – Misturas desenvolvidas do Grupo 03.	90
Tabela 11 – Síntese das Misturas desenvolvidas para gerar a referência.	92
Tabela 12 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 01.	94
Tabela 13 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 02.	96
Tabela 14 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 03.	98
Tabela 15 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 04.	100
Tabela 16 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 05.	102
Tabela 17 – Síntese das Misturas com aprimoramento.	104
Tabela 18 – Composições de referências aplicadas na calibração da impressora.	106
Tabela 19 – Composições aprimoradas aplicadas na calibração da impressora.	109
Tabela 20 – Resultado do ensaio de flexão das composições TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.	111
Tabela 21 – Resultado do ensaio de flexão das composições TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.	112
Tabela 22 – Estabilização das composições para ensaio de absorção de água.	113
Tabela 23 – Ensaio de absorção de água por imersão parcial.	114
Tabela 24 – Tabela de símbolos e unidades (adaptação da Norma Europeia ISO 15148:2002).	115
Tabela 25 – Diferença entre a massa inicial e a pesagem ao passar do tempo pela área.	116
Tabela 26 – Coeficiente de absorção de água.	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM/MA – Additive Manufacturing
CC - Contour Crafting
CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, THABA
DMEC - Digital Manufacturing for Earth Construction
FBAUP – Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto
FDM- Fused deposition modeling
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
I3D – Impressão 3D
IAAC - Institute for advanced architecture of Catalonia - Barcelona
LDM – Liquid Deposition Modeling
LOM – Laminated Object Manufacturing

MDD - Material Driven Design
OTF - Open Thesis Fabrication
SGC – Solid Ground Curing
SLA- Stereolithography
SLS – Selective Laser Sintering
UV – Radiação ultravioleta
WASP – World's Advanced Saving Project

Unidades de medida:

g - Grama
kg – Quilograma
mm – Milímetro
m – Metro
cm – Centímetro

Impressão 3D com terra crua: A ressignificação da aplicação
do solo na arquitetura e no design contemporâneo



CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi elaborada como parte do trabalho de conclusão de curso do Mestrado em Design Industrial e de Produto (MDIP), ministrado pela Faculdade de Engenharia (FEUP) e pela Faculdade de Belas Artes (FBAUP) da Universidade do Porto.

O presente capítulo apresentará o contexto e a motivação em que esta dissertação se insere, de modo a justificar a aplicação de uma argamassa à base de terra na indústria 4.0, com destino final para uso no setor da construção civil.

1.1 Contexto

No âmbito dos avanços tecnológicos na contemporaneidade, o Fabrico Aditivo apresenta-se como um método de fabricação voltado para a produção consciente e sustentável (Al Rashid et al., 2020). Neste contexto, observou-se um crescimento significativo no setor industrial, que impacta diretamente a rotina dos seres humanos. Esta tecnologia se inseriu de forma rápida e assertiva no desenvolvimento da Indústria 4.0, abrangendo setores como aeroespacial, automotivo, design, saúde e da construção civil (Al Rashid et al., 2020). Ao aplicar este método de fabricação é possível reduzir o desperdício de material, facilitar o processo de produção sob demanda, além de potencialmente diminuir o tempo e o custo do fabrico (Rejeski et al., 2018).

No setor da construção civil, ao comparar o uso de técnicas convencionais com a fabricação aditiva, não se observa uma ampla adoção das novas tecnologias de produção. Segundo Lopes (2016, p. 16), a resistência em adotar a impressão 3D na construção é resultante da tendência conservadora do setor, das preocupações relacionadas aos custos envolvidos na sua implementação e incertezas sobre a aplicabilidade desse método em estruturas de grande escala. Desta forma, o setor da construção segue com uma produção convencional e poluente, responsável por 30% das taxas globais de emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente, além de usufruir de grande parte das matérias-primas produzidas no mundo (Craveiro et al., 2019).

Perante os aspetos que caracterizam o setor da construção como um dos mais poluentes, é possível identificar uma tendência em substituir o uso de materiais que emitem CO₂. A terra crua apresenta-se como uma alternativa viável em certas aplicações aos materiais cimentícios, de modo a reduzir a demanda de um dos emissores de dióxido de carbono. No entanto, apesar da terra crua ser considerada de baixo custo e eficiente, sua aplicação ainda não é aceite pelo mercado (Taparello, 2016). Essa resistência resulta em lacunas sobre a aplicação da terra crua na impressão 3D, especialmente em relação à sua capacidade de extrusão, resistência, estabilidade e repelência à água. Para superar essas lacunas, este estudo busca explorar as propriedades técnicas da terra crua, promovendo sua adoção como uma alternativa sustentável e eficiente aos materiais convencionais.

1.2 Pertinência do estudo

O processo de obtenção de matéria-prima pelo setor da construção civil foi responsável, em 2021, pela emissão de 6% de CO₂ no ecossistema. Além disso, a aquisição destes materiais neste mesmo período gerou aproximadamente 100 mil milhões de toneladas de resíduos. Como consequência dessas altas taxas, prevê-se um aumento significativo do índice de geração de gases poluentes até 2060 (United Nations Environment Programme, 2022).

A poluição proveniente desse setor abrange diversas etapas, desde a obtenção de matéria-prima, até o transporte e utilização da mesma. O cimento, por exemplo, é um material amplamente utilizado e emissor de CO₂ durante a sua produção e o seu deslocamento (Wieser et al., 2021). O uso desse material também implica no emprego de fontes de energia não renováveis, além de apresentar uma elevada taxa de desperdício de resíduos (Jain et al., 2016).

Para enfrentar os desafios da degradação ambiental, organizações mundiais propõem soluções, tais como a mudança significativa do cenário atual de consumo de materiais, e a redução dos processos industriais poluentes (United Nations Environment Programme, 2022). Dessa forma, torna-se pertinente para o setor industrial realizar estudos sobre o uso de materiais naturais, renováveis, que não promovam impactos ambientais e que possuam baixas emissões de gases com efeito de estufa. A compreensão desta questão torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis e a mitigação da degradação associada à construção.

Neste cenário, a terra crua se apresenta como um material de grande potencial de aplicação, devido ao seu uso histórico, caráter biológico e origem natural. No entanto, sua aplicação na fabricação aditiva enfrenta limitações e desafios que demandam maior investigação. Desta forma, para aprofundar esse conhecimento, torna-se necessária a exploração de novas tecnologias de produção, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Assim, a impressão 3D destaca-se como uma área em expansão, com lacunas e oportunidades no avanço de sua aplicação no setor da construção.

A impressão 3D com uso da terra crua é um método construtivo que resgata abordagens vernaculares e se integra nos avanços tecnológicos da contemporaneidade. Esta técnica de produção também demonstra um potencial significativo para a promoção da sustentabilidade, uma vez que dispensa o uso de cofragem e reduz o uso de materiais emissores de dióxido de carbono.

Além disso, considerando o relatório elaborado pelo United Nations Environment Programme em 2022 é possível identificar que a produção com uso da terra crua se apresenta como uma solução para o cenário atual,

visto que neste documento é estabelecido como meta o alinhamento com o Acordo de Paris, até 2050. Este acordo visa a redução da produção de carbono líquido em edifícios e construções a uma taxa de zero emissões, face às altas taxas de emissões de CO₂ em 2020 proveniente do setor da construção (United Nations Environment Programme, 2022).

Assim, compreende-se que a associação da indústria 4.0 com o setor da construção é inevitável para um futuro mais sustentável. Neste contexto, a impressão 3D emerge como um mecanismo de otimização e automatização dos novos processos construtivos. A combinação deste processo com a técnica vernacular da construção com terra deve aprimorar o desempenho das características dos materiais naturais, de forma a auxiliar o setor.

Entretanto, para a aplicação da terra crua na Manufatura Aditiva (AM) ainda existe a necessidade de se analisar a sua adequabilidade neste método de produção, como o seu ganho de resistência mecânica, vulnerabilidade à água, entre outros fatores. Neste contexto, a dissertação destaca a importância desta investigação em explorar as novas tecnologias como meio de respostas aos desafios ambientais presentes na construção, através da aplicação da terra crua na impressão 3D, especificamente pela técnica de extrusão do material. Essa abordagem busca promover eficiência e sustentabilidade, integrando-se ao papel do design industrial em um estudo multidisciplinar.

Em conclusão, a pesquisa destaca-se como uma oportunidade de contribuição nas discussões sobre as limitações da impressão 3D com aplicação da terra crua, e investigação dos potenciais aperfeiçoamentos dessa tecnologia no âmbito de um design sustentável com baixas emissões de CO₂, alinhando-se com as exigências do século XXI.

1.3 Problema da pesquisa

A utilização da terra crua como material para impressão 3D apresenta desafios, apesar das características ecológicas e do histórico de uso secular do material. O abandono da aplicação do material demonstra uma contradição no contexto contemporâneo, uma vez que a terra crua é uma matéria-prima obtida sem passar por processamentos, amplamente disponível na natureza e com baixo impacto ambiental na sua extração.

Desta forma, percebe-se a existência de um estigma associado ao uso da terra crua, especialmente em países em que a construção com o uso deste está associada a uma imagem de pobreza (Lopes e Iino, 2004, as cited in Pinheiro et al., 2016). No Brasil, por exemplo, questões históricas estabeleceram uma conexão entre a construção em terra e a disseminação da doença de Chagas, levando à implementação de políticas públicas que buscam a eliminação de casas de taipa no ano de 1960 (Pinheiro et al., 2016). Essa política implementada foi criada com o objetivo de apoio sanitário, considerando os desafios que se estendem ao utilizar a terra crua.

Compreender estas adversidades que condicionam a aplicação do material, direciona a pesquisa para encontrar os motivos da aversão atual ao uso do material.

Dentre os desafios que norteiam a usabilidade da terra na construção, a sua vulnerabilidade ao entrar em contato com a água é uma das preocupações mais recorrentes (Eires et al., 2017). De modo a se destacar como uma das principais razões para o desuso em novas construções, considerando que ao passar por alterações no seu estado natural a terra torna-se plástica e em seguida rígida ao secar, podendo gerar fissuras (Minke, 2006, p. 24). Com isso, a construção com terra depende da sua composição específica e da incidência de fatores externos, apresentando-se de forma passível ao desgaste e perda de compostos em detrimento da humidade (Oliveira et al., 2010).

Diante desse cenário, torna-se pertinente para o desenvolvimento da dissertação compreender a vulnerabilidade encontrada no material, especialmente ao entrar em contacto com a água. Assim, esta investigação busca aprimorar a composição de terra com a inserção de outros materiais ou aditivos, para aumentar a sua repelência, de forma a torná-la adequada para a fabricação aditiva e para o setor da construção.

1.4 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo investigar a materialidade e o aprimoramento da impermeabilização da terra crua aplicada à impressão 3D, visando: melhorar a composição do material, aumentar a sua repelência à água e minimizar a perda da matéria ao entrar em contacto com a água. Desta forma, a proposta explora a terra crua como material alternativo a materiais cimentícios, reduzindo a necessidade do uso de compostos com elevadas taxas de emissões de gases poluentes.

Em relação aos objetivos específicos, a investigação pretende compreender as características necessárias para uma argamassa ser aplicada na fabricação aditiva, de modo a analisar as propriedades das composições de terra desenvolvidas, avaliar a resistência à água pelo material, potencial de extrusão, compreender a estabilidade e a retração da mistura após a impressão, validar a aplicabilidade do material em impressão de grande escala e contribuir para os avanços do conhecimento científico no setor.

1.5 Metodologia

A metodologia aplicada nesta dissertação emprega uma abordagem multidisciplinar, com o uso dos princípios de sustentabilidade, do material driven design, análise histórico-cultural, entre outros. Assim, entre os princípios investigados, os propostos por Ezio Manzini se enquadram como pertinentes para fundamentar o estudo. De modo a destacar a

necessidade de integração da sustentabilidade ao design, considerando o ciclo de vida dos produtos, a promoção da diversidade e a reutilização de matérias já existentes (Manzini, 2008). Esta compreensão do ciclo de vida de um material realça a importância de uma análise abrangente e o emprego da economia circular no desenvolvimento deste estudo.

Além disso, para o enriquecimento desta investigação alguns conceitos metodológicos foram aplicados em seu desenvolvimento. Como o Design Thinking, utilizado para compreender as necessidades dos seres humanos (Brown, 2008). Adicionalmente, a definição metodológica de Bürdek (2006, p. 225) que descreve o estudo como a somatória do conhecimento prévio do autor, fundamentada nas “condições histórico-culturais e sociais”. Para além, o método de pesquisa desenvolvido em 1973 por Horst Rittel também embasa o presente estudo, de modo a se definir pelas seguintes etapas: estabelecimento de um problema a ser solucionado; coleta de dados; compreensão das informações coletadas; desenvolvimento de uma ideia viável; pesquisa sobre as melhores alternativas de solução; e a realização de testes para verificação da proposta (Bürdek, 2006, p. 252).

Assim, para a aplicação destes conceitos, realiza-se um estudo sobre as problemáticas e as necessidades que o tema abrange, fundamentando-se em pesquisas bibliográficas. Em seguida, realiza-se o Estado da Arte, através da coleta de informações, contacto com pesquisadores do setor, estudo sobre o mercado e análise dos aspetos fundamentais para o desenvolvimento de misturas à base de terra para a impressão 3D. Posteriormente, estuda-se o aperfeiçoamento do material e o aplica em testes de extrusão manual, estabilidade, estético e de retração para qualificar a melhor mistura. Neste ponto, torna-se pertinente aplicar a metodologia de Material Driven Design (MDD), que considera quatro fases de estudo para um design de material. Estas envolvem, a análise das propriedades dos materiais, criação de experiências com o material, análise dos padrões resultantes das experiências e aplicação em produtos (Karana et al., 2015, p. 49). Assim, são realizadas investigações de composições, ensaios de extrusão, de construção em camadas, de resistência mecânica e de absorção de água. Para posterior seleção e aplicação final da melhor mistura na impressora Delta WASP40100, por meio da criação de um produto desenvolvido através de esboços, maquete e modelação tridimensional.

1.6 Resultados Esperados

Os resultados esperados para este estudo consistem no aprimoramento da argamassa à base de terra, de modo a se obter um material sustentável, com maior resistência à água e adequado para ser utilizado em tecnologias de impressão 3D na construção.

Além disso, através do desenvolvimento desta dissertação, pretende-se reduzir o estigma associado à vulnerabilidade das construções com terra.

Assim, promove-se a sua aceitação, adoção em larga escala, avanço do conhecimento no campo de aplicação e a introdução de novas perspectivas sobre o uso de materiais sustentáveis, com a finalidade de beneficiar tanto o meio acadêmico quanto o setor industrial.

No entanto, torna-se válido ressaltar que este processo de pesquisa pode enfrentar obstáculos, como a necessidade de encontrar a consistência adequada para a aplicação da argamassa ao equipamento de impressão 3D.

Impressão 3D com terra crua: A ressignificação da aplicação
do solo na arquitetura e no design contemporâneo



CAPÍTULO 2

2 ESTADO DA ARTE

O presente capítulo encontra-se dividido em quatro secções, com o propósito de proporcionar uma compreensão abrangente acerca do conhecimento atual sobre a impressão 3D com a aplicação da terra crua. Assim, esta investigação se inicia com uma introdução aos conceitos fundamentais da tecnologia de manufatura aditiva, seguido por um levantamento das palavras-chave que orientam o estudo das temáticas selecionadas para embasar a presente investigação. Posteriormente, realiza-se uma revisão bibliográfica e análise do mercado, de forma a fundamentar e gerar reflexões para o desenvolvimento do caso de estudo.

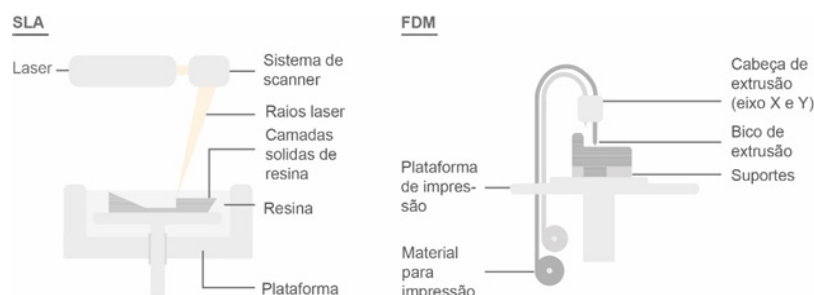
2.1 Introdução

Inicialmente, para o desenvolvimento desta investigação torna-se pertinente compreender o processo de manufatura aditiva, visto que é o método de produção selecionado para a aplicação da terra crua. Assim, uma compreensão generalista sobre o assunto é um ponto de partida fundamental para a progressão da investigação.

O processo industrial de manufatura aditiva simboliza uma rutura de paradigma da industrialização comercial. O método consiste na deposição de material em camadas, com a finalidade de criar objetos tridimensionais conforme a demanda, de maneira a resultar em menor perda de material e curto período de produção (Prince, 2014). Assim, este processo exige a consideração de diversas especificações, tais como o uso de materiais adequados, compatibilidade da geometria impressa e a otimização dos parâmetros de impressão (Al Rashid et al., 2020).

A tecnologia de impressão 3D se encontra no mercado desde 1987, com o comércio das impressoras de estereolitografia, desenvolvidas pelo Charles Hull. Posteriormente, entre 1991 e 1992, difundiu-se o conceito da manufatura aditiva, resultando em novos métodos de impressão 3D, os quais destacam-se: Fused Deposition Modeling (FDM), que utiliza a extrusão de material em camadas (figura 1); Solid Ground Curing (SGC), que envolve a solidificação do material polimérico sensível à radiação ultravioleta (UV); Laminated Object Manufacturing (LOM), deposição de folhas coladas em camadas, com consecutivo corte à laser para obtenção da forma; Selective Laser Sintering (SLS), que funde o pó do material através do uso de um laser (Wohlers, 2023).

Figura 01 - Esquema de exemplos de fabricação aditiva SLA (solidificação do material através de feixes de luz) e FDM (adaptação de Van Noort, 2012).



O processo de criação do objeto tridimensional para a fabricação aditiva pode se iniciar de diversas formas, como por um processo de escaneamento 3D ou com a concepção de um projeto elaborado em um software CAD (Computer-Aided Design), um programa computacional de modelagem tridimensional e ou bidimensional do produto. Após o modelo ser verificado e ajustado para a impressão, garantindo a integridade de suas dimensões e geometrias, ele dispõe da necessidade de conversão do formato do arquivo para um ficheiro G-code, ou outro formato que permita ser fatiado e compreendido pela impressora 3D (figura 02). Assim, a geometria é dividida em camadas e materializada através da deposição do material (Prince, 2014).

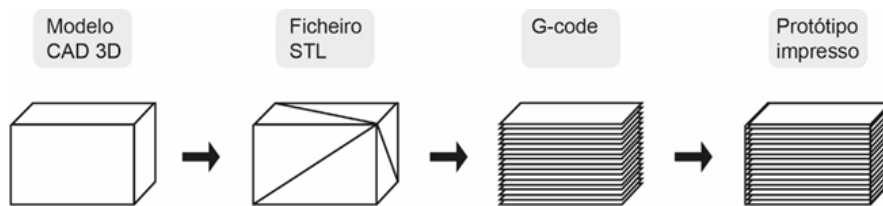


Figura 02 - Esquema para obtenção de um protótipo (adaptação de Neto & Soares, 2020, p. 54) (adaptação de Ribeiro, 2023)

Essa tecnologia se encontra como uma oportunidade para diversas áreas do conhecimento, desde a utilização nas indústrias automobilísticas, aeronáutica, no setor de saúde, arte, arquitetura e design (Prince, 2014, p. 40). Assim a AM se estabelece em diversos setores económicos, inclusive o da construção civil. Com a intenção de fornecer liberdade geométrica, automatização da produção, diminuição do custo de produção e gasto de material. Diante da falta de necessidade do uso de armações, moldes e fôrmas (propulsores de resíduos), utilizados em construções convencionais (Amran et al., 2022).

Para o setor da construção é essencial compreender as técnicas mais adequadas para a produção em grande escala, já que se refere a uma ramificação da indústria que trabalha com geometrias edificáveis. Segundo Teixeira (2018, p. 16), a impressão 3D abrange diferentes escalas, em um contexto direcionado para as produções em grande escala é aplicado o uso de materiais granulares, sendo os métodos mais utilizados: o Binder Jetting e Material Extrusion.

O modelo de impressão 3D por Brinder Jetting é constituído por um processo de solidificação em que a camada de um material em pó ou grão são espalhadas, para posteriormente um aglutinante ser pulverizado no local que é necessário. Em 1997, Joseph Pegna aplicou este método de fabricação aditiva em grande escala, com o uso de cimento como aglutinante sobre camadas de areia (Teixeira, 2018). Em 2007, Enrico Dini realizou a impressão 3D da primeira obra arquitetónica do mundo, o Pavilhão Radiolaria (figura 03), com aplicação de um pó mineral (figura 04) (D-Shape, 2024) (Turner, 2009a).



Figura 03 – Modelo 3D do Pavilhão Radiolaria (Turner, 2009b).



Figura 04 – Primeira obra arquitetônica impressa em 3D (Turner, 2009b).

No campo do Material Extrusion, o sistema de impressão se apresenta no mercado com maior frequência. Este processo de produção consiste na extrusão de filamentos em camadas. Para este método de produção é possível identificar algumas empresas que utilizam materiais cimentícios como base para efetuar a impressão em grande escala (Teixeira, 2018). A Contour Crafting Corporation, por exemplo, desenvolveu uma tecnologia para a impressão 3D, que dispõe de um acabamento refinado durante o processo de extrusão e se apresenta como uma das primeiras empresas a aplicar o concreto na fabricação aditiva (Contour Crafting Corporation, 2017). Além disso, a Constructions-3D também se apresenta como uma referência, visto que produziu a impressora MaxiPrinter, a qual destina-se para a construção aditiva em grande escala com uso do concreto (Constructions-3D, 2024).

Com os avanços tecnológicos na impressão 3D em grande escala, observa-se uma preocupação global perante as questões ambientais e a utilização de materiais emissores de CO₂. Assim, o uso da terra crua na fabricação aditiva começa a se inserir no contexto, à medida que demonstra um potencial para o futuro, visto os seus benefícios ambientais e económicos (Teixeira et al., 2023b). Neste sentido, algumas empresas e instituições de investigação, como a WASP e IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) utilizam o método de Material Extrusion, referido anteriormente, no processo de fabricação aditiva com a terra crua (figura 05), iniciando um novo movimento para a aplicação de materiais sustentáveis nesta vertente do setor da construção. Além disso, através de uma análise das obras que estão sendo desenvolvidas por estas entidades, é possível identificar mudanças nas composições de terra aplicadas. De modo a estabelecer uma busca pela melhoria do material sustentável destinado à impressão 3D em grande escala.



Figura 05 – TOVA, projeto impresso com aplicação da terra crua, desenvolvido pela WASP e IAAC (Severi, 2022).

Além disso, Yameng et al., (2023) reforça que a terra crua ainda apresenta a demanda de aprimoramento em sua composição, para que assim alcance uma impressão com maior qualidade. Dessa forma, mesmo que a impressão 3D com aplicação da terra crua já esteja no mercado por meio da extrusão do material, é possível identificar a importância do seu aprimoramento, de modo a motivar o desenvolvimento da presente dissertação.

2.2 Palavras-chave

A aplicação da terra crua na impressão 3D necessita de investigação, uma vez que apresenta desafios, como a necessidade do seu aprimoramento para aumentar a sua durabilidade e repelência à água. Além disso, esta pesquisa pode promover oportunidades, ao contribuir para o setor da construção ao se alinhar com o Acordo de Paris. Assim, para prosseguir com o estudo, foram elencadas uma seleção de palavras-chave, com o objetivo de recolher o máximo de conhecimento para o caso de estudo.

Na busca por uma composição de argamassas para a impressão 3D com terra crua, as palavras-chave escolhidas para o estudo refletem um ponto de partida, se identificando como:

- “3D Printing”: Devido ao método de produção escolhido para a aplicação da argamassa à base de terra;
- “Earth Construction”: Em função do conhecimento disposto nas diversas construções vernaculares com uso da terra crua;
- “Durability”: Com base na necessidade do aumento da durabilidade da argamassa à base de terra, para sua maior aceitação no setor da construção;
- “Material Design”: Com o intuito de recolher informações relativas ao desenvolvimento do material.

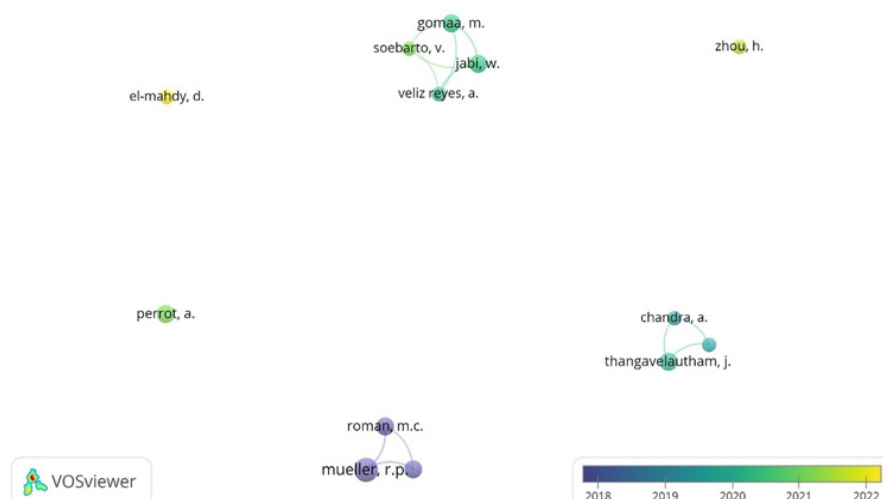
2.3 Revisão bibliométrica

Na perspectiva de alcançar referências pertinentes no âmbito da pesquisa, tornou-se necessário utilizar mecanismos de busca científica. O motivo que direcionou essa investigação foi a necessidade de identificar autores, tendências, lacunas e uma base teórica voltada para a aplicação da terra crua na fabricação aditiva. Para essa pesquisa foram utilizadas as palavras-chave selecionadas anteriormente - “3D Printing”, “Earth Construction”, “Durability”, “Material Design” -, uma vez que estas refletem os pontos de interesse desta dissertação. Dessa forma, a busca considerou o uso apenas dessas palavras, sem análise inicial de títulos e resumos, o que poderá ser considerado futuramente caso haja necessidade.

O sistema Scopus da Elsevier foi utilizado para efetivar a busca, visto que apresenta uma seleção de publicações indexadas, possibilitando uma recolha certificada. Por meio desse banco de dados, as informações levantadas foram transmitidas para o software de análise VOSviewer. O uso desse software gerou gráficos para a compreensão dos impactos das publicações, permitindo extrair informações sobre as temáticas trabalhadas, incidência das palavras-chave mais frequentes, estudo temporal, contagem de publicações e quantidade de citações por autor.

Para o levantamento inicial, utilizaram-se as palavras-chave “3D Printing”, “Earth Construction”, “Durability” e “Material Design”, o que resultou em apenas 4 documentos no Scopus, indicando uma baixa produção científica sobre o tema. Em seguida, a busca foi reformulada para “3D printing, earth construction, material design”, destacando o uso da terra na impressão 3D sem considerar o critério de durabilidade. Esse novo levantamento retornou 62 documentos, com 184 autores listados até 2024. Os dados foram então exportados em formato RIS para análise no VOSviewer. Após aplicar critérios de exclusão, foram selecionadas as publicações direcionadas à impressão 3D com uso da terra crua e com autores com alta recorrência no tema. Dos 184 autores, apenas 13 possuíam duas ou mais publicações na área, e desses, 10 mostraram correlação entre si, formando grupos de até 4 autores que se citavam ou eram coautores uns dos outros (figura 06). Esse levantamento indica que o tema da dissertação é recente, com poucas publicações disponíveis na área.

Figura 06 – Gráfico dos autores do banco de dados: “3D printing, earth construction, material design”, desenvolvido no VOSviewer. Fonte: Autora.



Consequentemente, se tornou necessário realizar outra pesquisa, relacionando a impressão 3D e os materiais utilizados. O encaminhamento desta pesquisa se procedeu pela aplicação das seguintes palavras-chave: “3D printing, mortar”. Nesta seleção foi identificado um total de 509 documentos, com 1 404 autores. Esta recolha de publicações demonstra uma atualidade na investigação desta vertente, posto que datam de um período temporal entre 2019 e 2024, reforçando a pertinência do tema. Os autores Duan, Z., Xiao, J., Zhang Y., Panda, B. e Shakor, P. apresentam-se com uma maior incidência autoral, destacando-se como autores relevantes para o estudo. Com relação às palavras-chave mais recorrentes, este grupo estudado conta com um total de 3 414 palavras, das quais 30 aparecem com uma recorrência mínima de 25 vezes, sendo o “concrete”, um dos casos de alta incidência, reforçando que o uso de materiais cimentícios são muito estudados no âmbito da I3D (impressão 3D).

De modo a afunilar a pesquisa, após identificar os materiais cimentícios como os mais usuais em publicações que se relacionam o uso da argamassa à impressão 3D, tornou-se pertinente realizar uma busca direcionada para a utilização da terra crua como material principal, visto a proposta da dissertação. Na seguinte seleção de palavras-chave dentro da plataforma do Scopus, foram utilizadas “3D printing” e “earth materials”. Através destas, verificou-se que existe uma tendência a vincular a impressão 3D com terra crua à palavra-chave “Nasa”. Esta situação decorre do programa “Challenges Centennial NASA’s”, que incentivou a investigação voltada para a fabricação aditiva fora do planeta terra, especificamente com a aplicação do solo como material base (Mueller et al., 2019).

Em seguida, através da consulta de alguns artigos que referenciam a impressão 3D com uso da argamassa à base de terra, identificou-se que muitas destas são usualmente com uma mistura semelhante ao utilizado na técnica vernacular de cob e adobe. Assim, buscou-se as palavras-chave “3D printing”, “earth materials” e “cob” no banco de dados do Scopus. Deste conjunto, identificou-se um total de 10 documentos, de 29 autores, dentre estes apenas 5 possuíam duas publicações ou mais nesta área. O autor Gomaa, M. se enquadra neste núcleo e se apresenta como uma grande referência para o desenvolvimento da dissertação. Estes documentos apresentam um total de 133 palavras-chave, através da leitura do gráfico de “densidade de impacto das palavras” (figura 07), foi identificado que a utilização da palavra “earth materials” encontra-se pouco difundida na área do conhecimento.

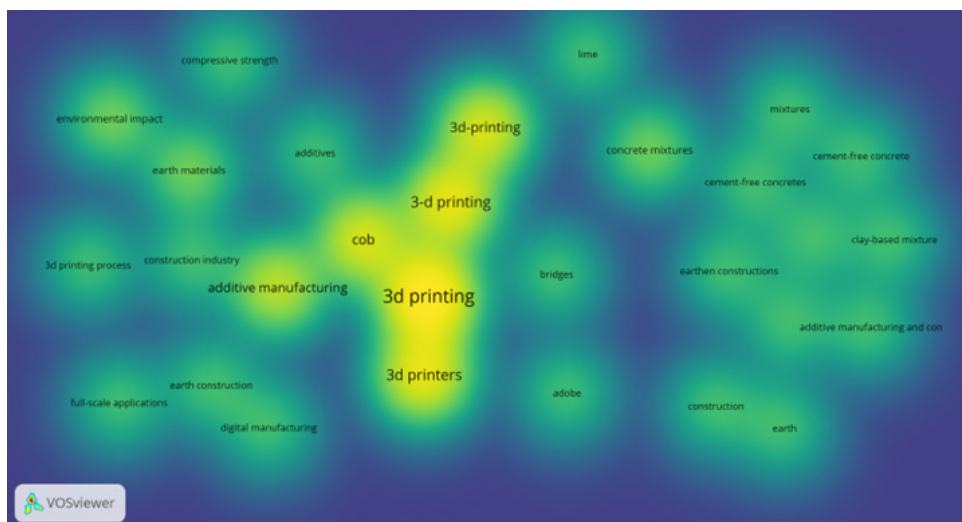


Figura 07 – Gráfico da recorrência das palavras-chave do banco de dados: “3D printing, earth materials, cob”, desenvolvido no VOSviewer. Fonte: Autora.

Posteriormente, com base na problemática que se busca aperfeiçoar na dissertação, tornou-se relevante efetuar outra pesquisa com as palavras-chave “earth construction” e “durability”. Entretanto, não foi possível identificar as incidências da vulnerabilidade da terra crua em relação ao contacto com a água. Assim, é compreendido que existe uma baixa disposição de documentos que retratam esta situação, além de se identificar tendências, padrões e lacunas relacionadas a materiais à base de terra crua.

2.4 Desenvolvimento dos temas

As informações adquiridas através do levantamento bibliométrico, fundamentaram o conhecimento teórico da dissertação e contribuíram para a formulação de cinco temas de estudo: “Argamassa para impressão 3D”, “Argamassa para impressão 3D com terra crua”, “Construção com terra”, “Argamassa hidrofóbica” e “Argamassa com reutilização de material”. Estas temáticas foram elaboradas com o propósito de compreender as tendências e lacunas existentes na aplicação de uma argamassa à base de terra na impressão 3D.

Assim, o primeiro tema a ser estudado a seguir, “Argamassa para impressão 3D”, apresentou como objetivo adquirir conhecimento teórico sobre os parâmetros necessários para a obtenção de uma mistura adequada para a fabricação aditiva. Posteriormente, pela necessidade de explorar a aplicação de materiais sustentáveis na I3D, o segundo tema a ser investigado foi: “Argamassa para impressão 3D com terra crua”. Este tema avaliou a viabilidade da aplicação de composições à base de terra na fabricação aditiva. Para além disso, em “Construção com terra” realizou-se uma análise histórica das técnicas de aplicação da terra no setor da construção, de maneira a fornecer insights sobre o aprimoramento da durabilidade do material. Em seguida, o tema “Argamassa

hidrofóbica” foi concebido com a finalidade de adquirir informações sobre misturas resistentes à água, posto que a terra apresenta vulnerabilidade a esse elemento. Por fim, o tema “Argamassa com reutilização de material” complementa a pesquisa, de forma a promover a percepção sobre as possibilidades de redução de resíduos do mundo através do reuso dos mesmos.

2.4.1 Argamassa para impressão 3D

A aplicação de argamassa na impressão 3D, foi explorada inicialmente por Joseph Pegna. Em 1997, este autor desenvolveu um estudo sobre a fabricação aditiva em grande escala, com o uso de uma composição composta por areia e cimento Portland, ativada pelo vapor de água (figura 08) (Pegna, 1997). Desde então, estes materiais estão sendo amplamente empregados na manufatura aditiva, visto o potencial dos mesmos em alcançar escalas arquitetônicas (Shakor et al., 2019).



Figura 08 – Bloco impresso com aplicação de cimento-sílica em 1997 por Joseph Pegna (Pegna, 1997).

Em 2016, Tay et al. (2016, p. 179) discorrem sobre a aptidão da aplicação de misturas feitas a base de areia, cimento, cinzas volantes, sílica ativa e água. De modo a apresentarem uma composição com proporção aproximada de: 55,17% de areia, 17,23% de cimento, 13,07% de cinzas volantes, 4,15% de sílica de fumo e 10,35% de água para cada m³. Com esta evidência, torna-se notório que o uso do cimento está presente em grande parte das composições e misturas para impressão 3D em grande escala. Além disso, estes autores perceberam que as espessuras das camadas resultantes se relacionam diretamente com o fluxo de saída da impressora. Identificam-se como requisitos essenciais para a aplicação de argamassa na I3D, os seguintes: uma relação entre a quantidade de água aplicada e a plasticidade do material, além de uma possível interferência na capacidade de impressão em detrimento das configurações da impressora (Tay et al., 2016).

O domínio da composição de uma argamassa para uso na impressão 3D compreende diversos aspetos, tais como a maximização da trabalhabilidade do material, obtenção de uma fluidez específica para extrusão, capacidade de ligação entre camadas, tempo de cura e o tamanho do grão dos agregados, que devem variar em torno de 2mm (Malaeb et al., 2015). Para os autores Gosselin et al., (2016), a capacidade de contacto entre as camadas demonstra também que existe outra relação pertinente entre a impressão 3D, o material e a geometria desenvolvida. Para além, estes autores aplicam uma argamassa de alto desempenho, constituída à base de cimento e agregados com granulometria maior que 4mm. Com isso, percebe-se um padrão granular à cerca de 5mm nas composições que utilizam agregados, de modo a apresentarem pequenas variações dentre as propriedades necessárias para a impressão e um constante uso de cimento.

Como visto anteriormente, a conexão entre o design da geometria e a impressão 3D pode interferir o contacto entre camadas impressas, e consequentemente o desempenho do material. Desta forma, existe a importância de se realizar ensaios e testes que levam em consideração as superfícies, arestas e variações entre filamentos (Kazemian et al., 2017). O uso destes ensaios para classificar a qualidade do material torna-se pertinente, pois estes irão definir a qualidade e o potencial da argamassa, para posterior usabilidade no setor da construção. Para Malaeb et al. (2015), as realizações dos seguintes testes são extremamente necessárias ao se compor uma argamassa para a impressão 3D, sendo estes:

- Extrusão do material;
- Resistência à compressão;
- Fluidez;
- Análise da capacidade de construção de 5 camadas do material;
- Relação da trabalhabilidade do composto e o tempo.

No estudo conduzido em 2017 por Kazemian et al., é reiterado o potencial do uso do cimento na impressão 3D, aplicado ao setor da construção. Além de reforçar que cada material tem um papel fundamental para a produção aditiva. De modo a apresentar uma composição com uso do cimento Portland; areia, com granulometria de 2,36mm; policarboxilato (HRWRA), para auxílio da fluidez; aditivo, para melhorar a viscosidade; fibra de polipropileno, para reforço à contração e evitar fissura com comprimento de 6mm; água; sílica ativa, que ajuda na hidrofília da mistura após secagem; nanoargila, para melhorar a estabilidade da composição (Kazemian et al., 2017).

Assim, com a procura pelo aperfeiçoamento de matérias para aplicação na MA, diversos autores se destacam neste assunto, por exemplo: Gosselin et al., (2016) com o emprego da resina (de polímero), para melhorar a qualidade das faces das camadas impressas; Hambach & Volkmer (2017) explorando a utilização de fibras de carbono, com o intuito de melhorar o desempenho da composição; Rushing et al., (2019) realizando uma análise dos agregados individualmente, de modo a encontrar uma mistura com bons resultados para extrusão, com aproximadamente: 9,19% de água, 18,88% de cimento, 47,95% de areia, 20,82% de agregado graúdo (cascalho com 9,5mm), 0,63% de bentonita, 1% de sílica, 1% de cinzas volantes, 0,26% de RCA e 0,14% de HRWR..

De modo geral, os autores demonstram uma preocupação em obter uma mistura mais adequada para alcançar a estabilidade na MA. Para isso, estes recorrem ao uso de alguns materiais, como o cimento, visto que este composto aumenta a resistência e durabilidade, além de reduzir a permeabilidade das composições. Assim, compreende-se que existe uma necessidade de atender aspetos (figura 09) essenciais na impressão de grande escala com o uso

de argamassas, como apresentado por Teixeira (2018, p.79) e Ma et al. (2018, p. 616) como: “Workability”, trata-se da trabalhabilidade do material adquirida após a mistura, podendo ser alterada ao longo do tempo, conforme característica técnica do material utilizado; “Extrudability”, é a capacidade de extrusão contínua do material; e “Buildability”, diz respeito a capacidade de empilhamento de camadas sem colapsar.

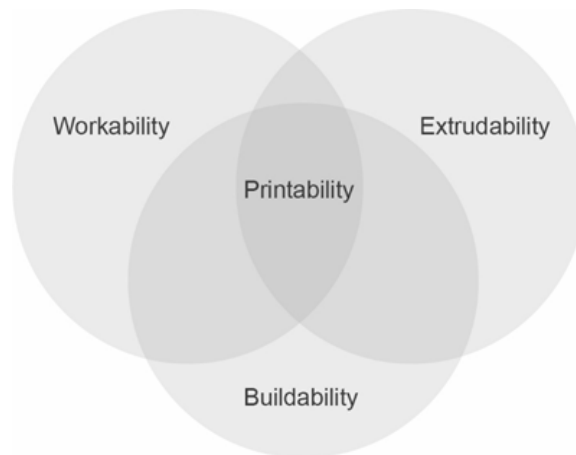


Figura 09 – Diagrama de Venn com requisitos para impressão 3D.

Além disso, foi possível perceber outra propriedade essencial para o desenvolvimento de um material destinado à impressão 3D. Isso inclui a trabalhabilidade, que em detrimento da perda de fluidez ao longo do tempo pode resultar em dificuldades no processo de impressão. Neste contexto, em busca de uma resolução para adquirir esta propriedade básica para a MA, foi identificado no estudo realizado em 2018 por Panda et al. o uso de um misturador contínuo para auxiliar o processo de impressão de materiais de endurecimento rápido (Panda et al. (2018). Assim, esta solução demonstra a importância de se compreender os aspectos determinantes para a qualidade da impressão e as características dos materiais aplicados, para que assim se encontre elucidações viáveis para os mesmos.

Além disso, outros fatores determinam a utilização do material, como: a rigidez ao se estabilizar na base de impressão, capacidade de suportar novas camadas, resistência à compressão e a compatibilidade com a máquina (Teixeira et al., 2023a).

Como resultado desta busca, percebe-se que no contexto científico o cimento é um dos materiais mais usuais na MA. Visto que este material apresenta uma maior eficiência na obtenção das propriedades necessárias para a impressão 3D (Yu et al., 2022, p. 6). Entretanto, o composto em questão possui um elevado impacto ambiental, desse modo ainda se torna necessário a busca por materiais mais sustentáveis para a indústria da fabricação aditiva (Tay et al., 2016). Além de atender aspectos essenciais para uma boa impressão 3D (tabela 01).

Tabela 01 – Relação entre material e impressora (responsabilidades na impressão), desenvolvido com base nas referências bibliográficas.

Material	Impressora 3D
Alta Fluidez;	Diâmetro da mangueira de impressão / Diâmetro do bico de extrusão;
Diâmetro do grão (máx. 4mm);	Diâmetro da mangueira de impressão / Diâmetro do bico de extrusão;
Tempo de cura;	Velocidade de impressão;
Alta trabalhabilidade;	
Maior adesão entre camada do material;	

2.4.2 Argamassa para impressão 3D com terra crua

A terra crua apresenta-se em diversas construções seculares, e recentemente na impressão 3D. Entretanto, materiais cimentícios continuam a ser a primeira opção no setor da construção, apesar de em uma análise comparativa entre a I3D com concreto e I3D com terra (gráfico 01) ter demonstrado que o uso da terra crua apresenta um desempenho ambiental 80% maior que o uso do concreto (Alhumayani et al., 2020). Desta forma, a fim de compreender o desuso deste material, torna-se imprescindível captar as limitações impostas pelo mercado para a falta de utilização do mesmo.

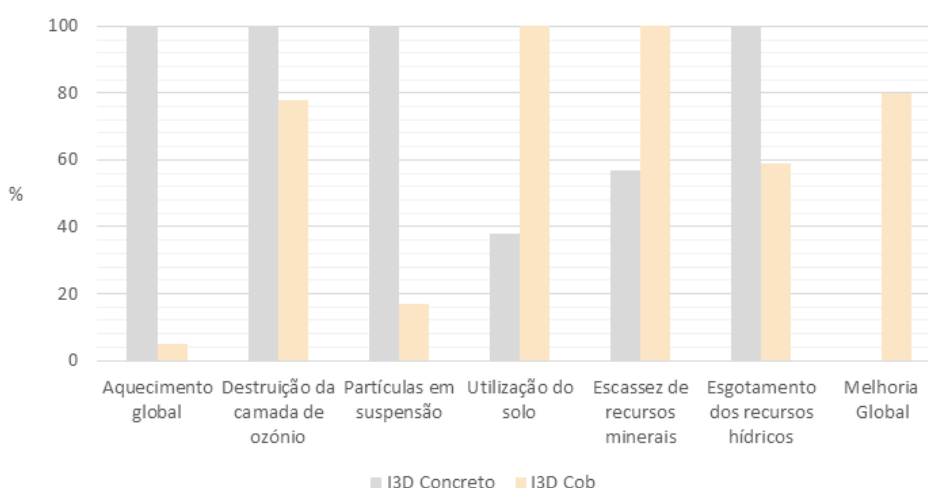


Gráfico 01 – Comparação ambiental entre I3D com concreto e I3D com composição de cob (adaptação Alhumayani et al., 2020).

A aplicação da terra crua na fabricação aditiva para a construção, é um processo conhecido como DMEC (Digital Manufacturing for Earth Construction), e se iniciou em 2011, com o desenvolvimento de projetos em escala reduzida (Gomaa et al., 2022). Em 2016, com os avanços da produção desta técnica, a empresa WASP realizou a primeira produção em escala arquitetônica. No entanto, apesar dos avanços na utilização deste método, esta abordagem representa apenas 15% das

publicações direcionadas à indústria da construção. Portanto, torna-se evidente a existência de lacunas nas informações e regulamentações sobre as composições à base de terra na I3D (Gomaa et al., 2022).

A necessidade crescente por materiais sustentáveis nos mais diversos setores económicos faz com que este cenário se modifique. Assim, este processo de adaptação do setor industrial se inicia através do uso de composições de adobe e cob na impressão 3D. Posto que, são misturas que apresentam uma qualificação no teor de humidade do material, além de percentual de plasticidade adequada para extrusão (Gomaa et al., 2022). Para Ferretti et al. (2022), dentre as tipologias de construção com terra, o cob é considerado como a melhor opção para vinculação à impressão 3D. Assim, de acordo com as propriedades necessárias nas misturas à base de terra, Alhumayani et al. (2020) e Gomaa et al. (2019) apresentaram um estudo detalhado sobre a impressão 3D com aplicação de mistura à base de cob. Alhumayani et al. (2020) reforçam a importância da semelhança entre a composição utilizada e as misturas convencionais. De modo que estes autores apresentaram uma impressão de uma parede com 60cm de espessura, tamanho similar à uma estrutura vernacular, composta por uma mistura de: 73% de solo, 23% a 25% de água para aumentar a fluidez e 2% de fibra em massa. Gomaa et al. (2019), desenvolveram uma impressão com uma composição contendo: 72% a 73% de solo, para 25% a 26% de água e 2% de fibra (% por massa do solo).

Este resgate da arquitetura vernacular no contexto contemporâneo se faz necessário e pertinente, de modo a conectar o contexto local e as novas tecnologias que se estabelecem ao passar dos anos. Como exemplo, os autores Buson et al. (2024) apresentaram os primeiros estudos nesta área do conhecimento na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A investigação desenvolvida por estes autores evidencia uma composição à base de adobe com aprimoramento para uma mistura com: 1kg de terra crua, 60g de fibra (papel proveniente dos sacos de cimento sem destino final) e 333ml de água.

Considerando que as composições vernaculares são a base para a impressão 3D com terra, o estudo da sua aplicação determina os aprimoramentos que estas devem ter. Para Perrot et al. (2018), a sensibilidade à água, a resistência a cargas e o tempo de cura são fatores que preocupam o uso do material terroso na impressão 3D, de modo a necessitar de variações na composição a ser aplicada. Desta forma, estes pesquisadores informam algumas condições para a otimização da fabricação, incluindo: efetuar o teste de bombeamento da composição antes da extrusão efetiva, com o objetivo de se avaliar a capacidade de estabilização do material ao ser depositado em camada; além de considerar a possível existência de uma deformação nas primeiras camadas desenvolvidas. Por meio destes estudos, estes autores desenvolveram uma mistura com terra crua, 45% de água e 3% de alginato, que aumenta a durabilidade do material e permite

melhorar a capacidade de construção, por consequência alcançar uma maior altura.

Além disso, a vulnerabilidade à deformação após extrusão em composições à base de terra demonstra mais uma questão a ser considerada ao se realizar a impressão 3D (Faleschini et al., 2023). Deste modo, Faleschini et al. (2023) aplicaram os seguintes materiais (tabela 02), com o objetivo de auxiliar neste quesito do processo de produção:

Tabela 02 – Quadro de materiais utilizados por Faleschini et al. (2023).

Material	Imagens do material (Faleschini et al., 2023)	Função do material segundo Faleschini et al. (2023)
Solo		Como material base para a composição;
Água		Para fornecer a fluidez e a resistência à composição ao ser extrudida;
Cal		Como ligante, unindo os agregados da mistura e favorecendo a coesão e rigidez ao ser unido à casa de arroz e ao pó de mármore;
Pó de mármore		A aplicação deste material reduz parcialmente o uso da cal, de modo a tornar a mistura mais sustentável. Além disso, seu uso tornou a mistura mais coesa e rígida;
Casca de arroz		Este componente é adicionado com a finalidade de auxiliar na retração proveniente da cura, de modo a evitar fissuras. Para além disso, a casca pode substituir parcialmente o uso da cal tornando a mistura mais sustentável;
Areia		A sua aplicação torna o solo adequado para fabricação aditiva, de forma a limitar as tensões;
Escória		Aplicado para substituição parcial dos ligantes cal e cimento, tornando a mistura mais sustentável;
Cimento Portland com alto teor de calcário		Aplicado com a finalidade de aumentar a resistência mecânica e durabilidade da mistura;
Fibra de juta, sisal, coco e pelo de cabra		Estas apresentavam uma espessura de 1mm a 0,2mm e comprimento entre 50mm e 10mm. Foram testadas para a substituição da palha, visto que este componente apresenta um comprimento maior que as demais, de modo a bloquear a passagem do material pelo bico da extrusora. Além disso, estas fibras foram testadas também com o intuito de promover a redução da retração da geometria durante a cura, melhorar a resistência à tração, tenacidade e ductilidade. Em destaque, o uso da fibra de coco, que apresenta melhor resistência à compressão;

Assim, visto que os materiais terrosos são altamente influenciados por compostos inseridos à mistura, Algenae & Memari (2022) desenvolveram uma composição de 49% de argila, 24,2% de água, 15,3% de areia, 10% de cal e 1,5% de fibra, em percentagem sobre a massa da mistura. Com base nesta amostra, obtiveram a conclusão de que:

- O aumento excessivo da água na composição à base de terra crua não melhora o desempenho do material na impressão 3D;
- A resistência à compressão melhora ao se inserir cal;
- A substituição parcial da água por fibra e cal auxilia de forma geral a performance da mistura;
- O tempo que a geometria demanda para a I3D, pode afetar o comportamento de ligação entre camadas;

Em Ferretti et al. (2022), os aspetos principais que devem ser atendidos para efetuar uma fabricação aditiva com terra crua são:

- Capacidade de extrusão;
- Capacidade de construção;
- Trabalhabilidade;
- A resolução das limitações encontradas nas misturas;

Assim, estes autores investigaram sobre as variações dimensionais das fibras, visto que estas podem interferir no processo de extrusão, e no aumento da resistência à compressão destas composições em comparação às misturas sem fibras. Além disso, verificaram que a aplicação da cal com uma fibra vegetal ajuda na proteção contra proliferação de bactérias, insetos e fogo. Deste modo, desenvolveram uma formulação à base de 70,42% de solo (argiloso e siltoso), com 4,70% de cal (estabilizador da mistura), 4,69% de cal hidráulica (para rápida cura), 18,78% de sílica e 1,41% de casca de arroz (fibra), em percentagem sobre a massa da mistura (Ferretti et al., 2022).

Ademais, como referido anteriormente, as composições devem atender as necessidades da impressora que será utilizada. Silva et al. (2022) apresentaram um estudo voltado para uma mistura constituída por terra crua, fibra e biopolímeros. Esta composição apresenta uma proporção de: solo; 5% de gel de amido de batata, para estabilizar a composição; 1% de fibra de sisal (constituída por celulose, hemicelulose e lignina), para reforçar a estrutura; e água. Assim, para a verificação da aplicabilidade do material em uma impressora 3D, os autores realizaram diversos ensaios, como por exemplo: de empilhamento, capilaridade, estabilidade, cisalhamento, potencial de impressão de filamento, endurecimento, Vicat e compressão. Com base nestes ensaios, se identificou que o gel de batata aumenta a viscosidade, as fibras diminuem a criação de fissuras, e a aplicação do amido repele a água (Silva et al., 2022).

Assim, como síntese do levantamento das argamassas à base de terra destinadas à impressão 3D, temos as seguintes referências para o Caso de Estudo da dissertação, apresentadas na tabela 03:

Tabela 03 – Composições de misturas de argamassa à base de terras para impressão 3D.

Autores	Composições
Perrot et al., (2018)	• Terra crua: 100% • Água: 45% • Composto de alginato (biopolímero de algas): 3%
Gomaa et al., (2019)	• Solo: 72% - 73% • Água: 25% - 26% • Fibra: 2%
Alhumayani et al., (2020)	• Solo: 73% • Água: 23% - 25% • Fibra: 2%
G. Silva et al., (2022)	• Solo: - • Gel de amido de batata: 5% • Fibra de sisal: 1% • Água: -
Alqenaee & Memari, (2022)	• Argila: 49% • Água: 24,2% • Areia: 15,3% • Cal: 10% • Palha: 1,5%
Ferretti et al., (2022)	• Terra crua (argiloso e siltoso): 70,42% • Cal: 4,70% de cal • Cal hidráulica: 4,69% • Sílica: 18,78% • Casca de arroz: 1,41%
Faleschini et al., (2023)	• Terra crua: 45,72% • Água: 20% • Areia: 22,78% • Fibra de sisal: 0,5% • Casca de arroz: 1,375% • Pó de mármore: 1,375% • Cal: 8,25%
Buson et al. (2024)	• Terra crua: 1kg • Água: 333ml • Fibra: 60g

Ensaios

Ademais, como referido anteriormente, para a validação da usabilidade destas misturas terrosas, alguns dos autores citados realizaram ensaios técnicos. Neste sentido, para o direcionamento da presente dissertação, foi conduzido um levantamento dos principais testes aplicados:

- Teste de impressão de filamento (Filament printing test): Ensaio aplicado por G. Silva et al. (2022) para compreender a consistência do filamento em relação a velocidade de extrusão (15mm/s, 20mm/s, 25mm/s, 30mm/s), de modo a garantir uma composição com continuidade dimensional adequada para as subseqüentes camadas (figura 10).

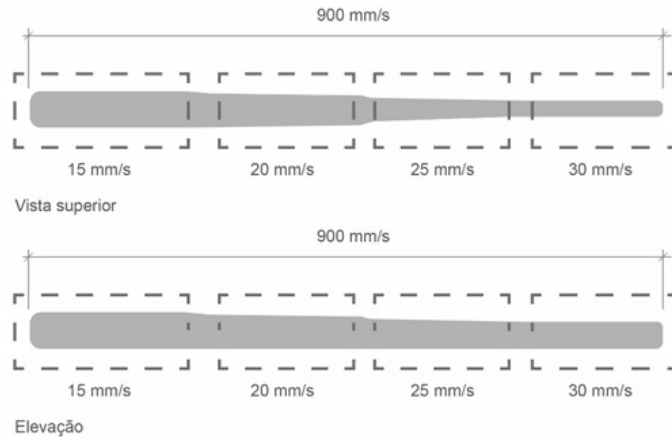


Figura 10 – Desenho esquemático do teste Filament printing test (adaptação de G. Silva et al. (2022)).

- Teste de estabilidade do cilindro (Cylinder stability test): Este ensaio foi realizado por G. Silva et al. (2022), como uma adaptação do slump test. O teste tem como objetivo compreender a estabilidade da composição terrosa, além de avaliar a deformação da mistura ao receber diferentes cargas. Esta avaliação experimental conta com o preenchimento de um molde cilíndrico, com posterior desmolde da mistura e a adição das cargas sobre a composição (figura 11). Esta resolução fornece informação sobre a capacidade da mistura em manter sua forma durante o processo de impressão.

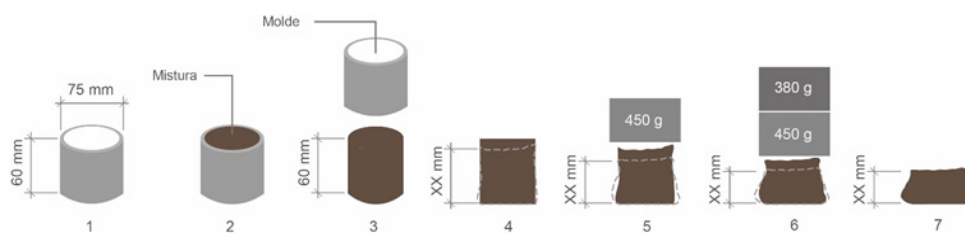


Figura 11 - Desenho esquemático do teste Cylinder stability test, adaptação do ensaio realizado por G. Silva et al. (2022).

- Efeito start-stop: Estudado por Bellini (2002) e Santana (2015), o efeito trata-se da formação do filamento através da variação da velocidade de extrusão do material e o seu fluxo. Nesse processo, a velocidade inicial aplicada pela impressora tende a ser maior do que a final, o que pode acabar ocasionando em variações na conformação do material extrudado. Esta situação demonstra a importância da efetivação de testes preliminares da extrusão do material, de forma a validar a velocidade e o fluxo aplicado, evitando o “defeito start-stop”.

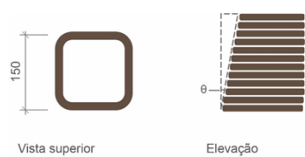


Figura 12 - Desenho esquemático do teste Stacking test adaptação do ensaio realizado por G. Silva et al. (2022).

- **Teste de empilhamento (Stacking test):** Ensaio aplicado na investigação de G. Silva et al. (2022), com o objetivo de compreender a capacidade de construção do material na fabricação aditiva, além de ser um parâmetro para a resistência do material à esforços. O teste foi desenvolvido através da impressão 3D de um máximo de camadas possíveis sobrepostas, em um intervalo de tempo entre camadas de 30 a 40 segundos. O processo é finalizado quando a impressão entra em colapso ou apresenta uma inclinação maior que 5° , a camada que antecede estas duas hipóteses determina o limite da impressão do material (figura 12).
- **Teste de fissuração por retração (Evaluation of shrinkage cracking):** Este ensaio foi aplicado por G. Silva et al. (2022), devido ao alto índice de retração presente no material terroso durante o processo de cura. O teste consiste na impressão de dois filamentos de 300mm, os quais são monitorados em um período de 28 dias. Durante este espaço de tempo mede-se o comprimento inicial e final destes filamentos, sendo posteriormente analisados (figura 13). Caso algum dos filamentos apresente fissuras maiores que 1mm, conforme o limite estabelecido pelo Building Research Establishment (1995), estas amostras são excluídas.

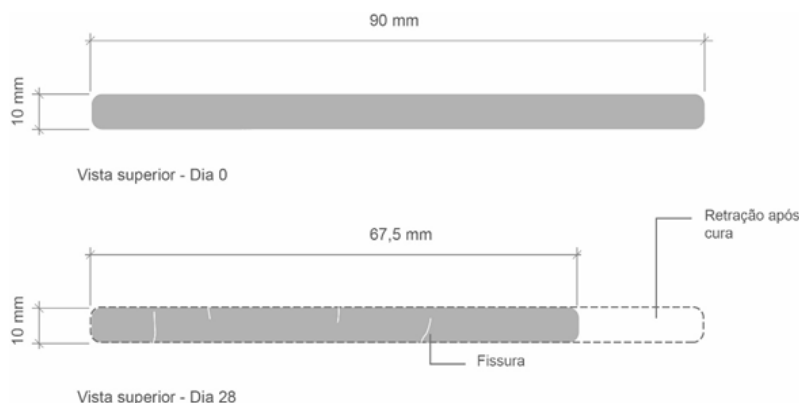


Figura 13 – Desenho esquemático do teste Evaluation of shrinkage cracking.

- **Teste de compressão uniaxial (Uniaxial compression test):** O teste de compressão foi realizado pelo G. Silva et al. (2022), com misturas de terra crua para impressão, com uso da MTS Exceed 45.105. As amostras apresentavam um tempo de cura de 3, 7 e 28 dias, esta variação determina a evolução do ganho de resistência das composições através do tempo.
- **Medição da resistência à compressão (Compressive strength measurements):** Este teste foi desenvolvido na investigação realizada por Perrot et al. (2018), com o objetivo de encontrar a mistura mais adequada para a aplicação na impressão 3D. Assim, o ensaio envolveu a disposição de amostras sob uma carga de 50kN, com velocidade constante de 1mm/min.

- Módulo de rutura (Modulus of rupture): O ensaio conduzido por Alqenaee & Memari (2022) foi realizado de acordo com o ASTM International C293, que estabelece os procedimentos para determinar o módulo de rutura. Para a execução do ensaio, as amostras são submetidas a uma carga máxima até a sua falha, em seguida se analisa a resistência à flexão que o material suporta, e realiza-se um estudo comparativo entre as amostras estudadas.
- Teste de absorção capilar (Capillarity absorption test): Este ensaio foi realizado por García-Vera et al. (2020) e G. Silva et al. (2022), com o objetivo de analisar de forma quantitativa a absorção de água por capilaridade de amostras terrosas em função do tempo, sem qualquer perda de material. Em G. Silva et al. (2022), o teste foi conduzido utilizando um filamento impresso curado durante 90 dias, e disposto em contato direto com uma toalha molhada. Após o início dos testes, a massa da amostra foi medida 10 vezes em um período de 20min, assim verifica-se o percentual hidrofóbico do material.

2.4.3 Construção com terra

A utilização da terra crua na contemporaneidade impulsiona a necessidade de se aprofundar o conhecimento, com base na utilização secular do material. O método construtivo vernacular com aplicação do solo como matéria-prima está presente na sociedade desde os primórdios. Atualmente, este assunto é estudado por diversos autores, com o objetivo de compreender a aplicação desta técnica em um contexto global, desde o uso pelos povos Maia no México, até a China, com a construção da Muralha da China (Torgal et al., 2009). Assim, este método de construção data de um período entre 12 000aC e 7 000 aC, com diversas construções como referido anteriormente (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).

Na atualidade, as construções com terra vêm crescendo gradativamente e os locais com maiores avanços são: Reino Unido, Alemanha, França, Estados Unidos, Austrália e Brasil. Além disso, em um cenário global é possível identificar a disposição de algumas normativas para o manuseio deste material, como na Alemanha, Austrália, Espanha, Estados Unidos, Nova Zelândia e Zimbábue (Torgal et al., 2009). Esta normatização promove uma maior aplicabilidade do material, visto que certifica a aplicação do mesmo no setor (Pinheiro et al., 2016).

No âmbito dos países que apresentam avanços constantes nesta temática, o Brasil apresentou dois anos com maiores crescimentos, estes sendo em 1990, proveniente de pesquisas realizadas sobre as técnicas e sua reinserção do material no setor, e em 2010, decorrente de avanços científicos. Estes aprimoramentos desenvolvidos no material à base de terra incidem em métodos alternativos para as construções convencionais, como o caso do solo cimento (Pinheiro et al., 2016). Em contraponto, em Portugal local

em que se insere a presente dissertação, a utilização da terra crua como método construtivo se encontra em partes específicas do território, com a sua aplicação em taipa, adobe e tabique, sem normatização para manuseio (Torgal et al., 2009). Esta disposição atual evidencia a necessidade de existir uma maior quantidade de investigações nesta área do conhecimento, de modo a promover a disseminação do uso da terra crua no setor da construção.

Assim, compreendendo a aplicação da terra crua nas construções vernaculares se promove um avanço no conhecimento, e por consequência na sua disposição no território. Esta utilização do material na construção civil decorre de três métodos distintos, monolítico, unidade e enchimento (Torgal et al., 2009). A primeira consiste na deposição do material terroso (húmido) in situ; a segunda refere-se ao fabrico de blocos de terra, com posterior montagem para fechamento de paredes; e a última, é a técnica de preencher com terra painéis de ripas de cana ou vime entrelaçadas, que se encontram nos espaços destinados às paredes (Torgal et al., 2009). Esta última técnica, também é conhecida como “terra de recobrimento” e se apresenta em diversas localidades, como na América Latina e Europa (Fernandes, n.d.). Além disso, para a produção em uma destas hipóteses, se faz necessário escolher o tipo de relação entre o material e a humidade, podendo ser obtidas por método húmido ou seco: a primeira refere-se a uma composição de terra que apresenta uma percentagem de água, ocasionando em um fator de plasticidade, presente em técnicas de cob, pau-a-pique, adobe e taipa; já o método seco, encontra-se no uso de um material sem a inserção de líquidos, como por exemplo a construção por taipa de pilão (Gomaa et al., 2022).

Historicamente, os usos da terra crua nestas técnicas referidas anteriormente, apresentam diversas vantagens, que faz com que este material se destaque em comparação a outros. Entre estes benefícios está o conforto térmico, proveniente da baixa transmissividade do material, a sustentabilidade, por não apresentar grande impacto ambiental e sua possível reciclagem. Entretanto, este material também apresenta falta de padronização, alta vulnerabilidade em relação ao contacto com a água e retração durante o processo de secagem (Pisani, 2004). Estas últimas questões apresentadas, como outras, contribuem para a falta da sua aplicação. De acordo com Barbosa (2005), outro motivo para a redução da utilização da terra crua neste setor foi a associação deste material com a falta de saneamento e a pobreza, o que levou muitos locais a optarem pelo uso do concreto, aço e blocos cerâmicos. Assim, resgatar uma técnica vernacular e inseri-la em um contexto contemporâneo que valoriza a sustentabilidade, ajuda a destigmatizar a sua associação com a falta de saneamento, de modo a tornar a sua aplicação pertinente.

Com base nestas questões levantadas, a revisão bibliográfica se estende

sobre as técnicas de construções com terra que são utilizadas ao longo dos anos. Além disso, procura-se compreender quais são as soluções utilizadas para lidar com a problemática da perda de material quando em contacto com a água.

Taipa

A taipa é um método construtivo que utiliza a terra crua, sem acrescentos de água, obtido através da compressão do material em uma cofragem (figura 14). Essa técnica iniciou tradicionalmente com a prensagem manual, por meio de um pilão, posteriormente o processo foi otimizado com a mecanização do equipamento de prensagem (Torgal et al., 2009). Assim, trata-se de uma das técnicas monolíticas, obtidas por método húmido (água da própria terra crua), podendo ser aplicada também no método seco, visto a possibilidade de se utilizar como Taipa de Pilão em regiões secas.

Este tipo de construção se encontra em diversas construções milenares, como por exemplo em vestígios do século IX a.C. na Tunísia. Posteriormente, sua aplicação se propagou para outras localidades, como a China e a Europa. Em particular, sua aplicação se estende com grande incidência no Sul de Portugal (Franke, 2017).

Em posteriores estudos sobre as composições com este método de construção com terra, foram realizadas adaptações do material, como a inserção do cimento às misturas, de modo a melhorar as características técnicas de resistência da composição material em espessuras menores (Torgal et al., 2009). Além disso, o revestimento da taipa também auxiliou em alguns casos de prolongamento no tempo de vida do material, como o exemplo na inclusão de uma superfície de argamassa com cal, areia e esterco sobre a construção, de modo a auxiliar em uma maior proteção contra erosão e água por capilaridade (Pisani, 2004). Em conjunto, a disposição de fundações de outros materiais, como alvenaria de pedra na base, evita o contacto com a humidade por capilaridade pertencente naturalmente no solo (Torgal et al., 2009, p. 35).

BTC (bloco de terra comprimido)

Os blocos de terra comprimidos são desenvolvidos através da prensagem do material em formas de blocos (figura 15), de modo manual ou hidráulico, que consiste em um processo mecanizado (Torgal et al., 2009). Além disso, este método pode apresentar variações em sua dimensão, com disposição entre vazados ou maciços (Santiago, 2001).

Para a melhoria das propriedades do material utilizado, a composição de argamassa pode sofrer a inclusão de cimento, cal ou fibras (Santiago, 2001). Além disso, pode ser observada a inserção de óleo de linhaça para aumentar a repelência à água (Escrivanes, 2019, p. 47).

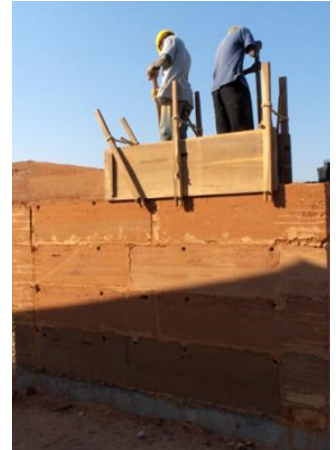


Figura 14 – Construção em Taipa (Mendes, 2006)



Figura 15 – Construção em BTC (Escrivanes, 2019)

Cob

A mistura aplicada no método construtivo em cob apresenta semelhança com as demais técnicas. Para a produção com esta técnica, inicialmente se prepara a mistura de terra, fibra e água, que em seguida é despejada no local de destino e nivelada no formato das paredes, para posterior secagem (Hamard et al., 2016).



Figura 16 – Construção em Cob (Coimbra, 2017).

O processo para adquirir a geometria desejada é obtido por meio de uma técnica vernacular, que envolve o empilhamento de camadas de terra crua, para posteriormente esculpir (figura 16) (Franke, 2017). Desta forma, o material que a princípio é plástico torna-se rígido e ganha mais estabilidade devido ao processo de cura da composição (Quagliarini et al., 2010). Assim, em comparação às técnicas apresentadas esta se classifica como uma produção húmida. Uma vez que exige um maior percentual de plasticidade para sua trabalhabilidade, diretamente relacionado ao teor de água.

Adobe



Figura 17 – Produção de tijolos de Adobe (Torgal et al., 2009).

O Adobe é um método construtivo que também apresenta uma alta percentagem de água na composição de terra crua e fibra, visto a necessidade de se ter uma eficiente plasticidade (Torgal et al., 2009). Esta técnica de fabricação foi desenvolvida pela modelagem em formas, com posterior cura sem queima (figura 17) (Santiago, 2001, p. 48). Os moldes aplicados em sua totalidade eram inicialmente de madeira, podendo apresentar variações de dimensões (Torgal et al., 2009).

Os avanços tecnológicos influenciaram esta produção, de maneira a automatizar o processo, com a utilização de misturadoras, máquina de extrusão, e equipamento de corte, para obtenção da seção do bloco (Santiago, 2001, p. 48). No contexto de aperfeiçoamento das misturas a base de terra, esta técnica apresenta a incorporação do cimento, com o objetivo de melhorar a proteção do mesmo contra intempéries (Torgal et al., 2009, p. 45). Este estudo apresenta uma perspectiva de busca pelo melhoramento das composições vernaculares e dos métodos de fabricação, de modo a demonstrar a pertinência de se compreender a vulnerabilidade presente nos mesmos.

Tabique / Pau a pique

Esta técnica apresenta uma grande variação de nomes, a depender da região que se utiliza, um desses exemplos é o termo Tabique, que é utilizado em Portugal, e o Pau a pique, encontrado no Brasil. O tabique é classificado como um método de construção de paredes por enchimento húmido (Torgal et al., 2009).

O processo de obtenção deste método conta com o uso da terra crua com alto teor de plasticidade, aderido a um painel de ripas de cana ou vime (figura 18), com posterior secagem de forma natural (Torgal et al., 2009). Neste processo, o maior ponto de conflito está entre a materialização e a durabilidade da composição utilizada ao passar do tempo. Além disso, neste contexto existe a preocupação da perda de rigidez da estrutura interna, devido a distribuição das cargas (André Manuel Chéu Pires, 2013). Em contraponto, Lisboa (2019, p. 51) identifica que a aplicação de revestimento nesta técnica pode auxiliar na preservação do material aplicado. Um dos exemplos expostos por Eires et al. (2017) foi a utilização do óleo de cozinha e a cal viva, os quais ao serem inseridos na mistura potencializaram a proteção contra intempéries.

Solo-Cimento

Como visto anteriormente, as variações das técnicas vernaculares se apresentam na sociedade há muitos anos, como no caso do solo-cimento (figura 19). Esta composição é aplicada em diversas localidades, a fim de reduzir os custos durante a produção. Além disso, este método de produção se manifesta em diversas formas, desde estruturas monolíticas até blocos comprimidos, compostos por uma mistura de terra crua, cimento e água (S. Silva, 2005).

Segundo o CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), a inserção do material cimentício nesta composição estabiliza a mistura, de modo a aumentar a resistência mecânica e a durabilidade do mesmo. Por outro lado, a cal também apresenta uma ótima estabilização, além de ter parâmetros técnicos semelhantes ao cimento em contato com a terra crua (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. THABA., 1984, p. 27). Desta forma, a aplicação do cimento pode ser substituída pela cal, visto que é um material com menos impacto ambiental.

Kraftterra

Na contemporaneidade, a busca pelo aprimoramento do desempenho de materiais é cada vez mais evidente. O professor arquiteto Buson (2009) realizou uma vasta pesquisa sobre os impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil, em conjunto a uma investigação sobre composições à base de terra crua. De modo a compreender o potencial da utilização de uma nova composição que promovesse a sustentabilidade através da reutilização de resíduos.

Esta pesquisa contou com a produção de blocos compactados, compostos por uma combinação de resíduos de sacos de cimento com comprimento máximo de 12mm (kraft) e terra crua (figura 20). O estudo realizado pelo arquiteto investiga o desempenho das fibras presentes no kraft, que ao serem adicionadas à composição resultaram em um material com uma excelente incorporação, oferecendo um melhor suporte à tração e



Figura 18 – Construção em Tabique (Olender, 2006).



Figura 19 – Produção de tijolo solo-cimento (Ferrari et al., 2014).



Figura 20 – Mistura de Kraftterra (Buson, 2009).

compressão, embora absorva mais água (Buson, 2009). Para além disso, o autor também se utilizou de materiais orgânicos, como a seiva de babosa, para reduzir a absorção de água pela mistura desenvolvida.

A proposta desenvolvida por Buson em 2009 está diretamente relacionada à dissertação, uma vez que visa a redução do impacto ambiental gerado pelo setor da construção civil, por meio da utilização de resíduos e de materiais com baixa emissão de CO₂, como a terra crua.

Síntese das técnicas de construção com terra

Com base no estudo desenvolvido sobre as técnicas de construção com terra, foi possível identificar que as composições e os métodos de manuseio variam. Desta forma, torna-se pertinente realizar uma análise sintética comparativa entre as suas variações e características mais pertinentes.

A diversidade existente no campo da construção com terra reflete o potencial de adaptação da sua aplicação na contemporaneidade, um exemplo deste manuseio é o Kraftterra, que demonstra o potencial do aprimoramento de um método tradicional. Assim, para compreender os aspetos fundamentais de cada uma destas técnicas previamente analisadas, foi elaborada uma tabela de resumo das características das mesmas (tabela 04).

Tabela 04 – Resumo de técnicas de construção com terra crua e seus aspetos principais.

Técnicas de construção com terra	Imagens das técnicas	Características pertinentes
Taipa		Terra crua comprimida (Torgal et al., 2009); Uso de revestimento como cal, areia e esterco, para melhorar durabilidade (Pisani, 2004);
BTC (bloco de terra comprimido)		Mistura a base de terra crua, com inserção de materiais para auxiliar nas propriedades, como o cimento, cal e fibras (Santiago, 2001);
Cob		Mistura de terra, fibra e água (Hamard et al., 2016); É uma composição plástica que cura com o tempo (Quagliarini et al., 2010);
Adobe		Alta percentagem de água e eventual uso de fibras para evitar fissuras (Torgal et al., 2009);
Tabique / Pau a pique		Terra crua como matéria-prima e possível uso de cal ou óleo para melhorar a repelência à água (Lisbôa, 2019, p. 51);
Solo-cimento		Mistura que contém a terra crua, cimento e água (S. Silva, 2005); Cimento agrega um papel de isolamento contra humidade (S. Silva, 2005); A cal pode ajudar na estabilização e apresenta parâmetros semelhantes ao cimento na terra crua (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. THABA., 1984);
Kraftterra		Reutilização de resíduos para obtenção de mistura para BTC de terra crua (Buson, 2009); Maior absorção de água, proveniente do kraft; Inserção da seiva de babosa para redução da absorção de água; Estudo de um novo design de material para compor construções com terra crua; Aplicação de técnicas vernaculares em construções contemporâneas;

2.4.4 Argamassa hidrofóbica

As argamassas constituídas à base de terra apresentam uma vulnerabilidade constante em relação ao contacto com a água (Camões et al., 2012). Desta forma, torna-se necessário considerar as argamassas que são hidrofóbicas ou impermeabilizadas utilizadas secularmente, de modo a fundamentar os próximos passos da dissertação.

Assim, segundo os autores Camões et al. (2012), o método de construção vernacular apresenta diversas técnicas para solucionar e auxiliar a demanda de impermeabilização. Entretanto, ao longo dos anos, estes tratamentos caíram em desuso devido à associação das construções em terra com uma suposta baixa qualidade. Na investigação desenvolvida por estes autores, foi possível identificar algumas destas soluções, como a elevação da construção em relação ao solo, além da inserção de revestimento (tintas ou ladrilhos) para evitar a humidade por capilaridade. Além disso, a pesquisa indica a versatilidade de se utilizar materiais com maior repelência a líquidos e agentes húmidos, tais como: cal-pozolanas, cal hidratada com óleo, esterco, palha, cacto (*opuntia ficus*), látex, dammar, sangue animal, hidróxido de sódio. Dentre estes materiais, as composições que se destacaram como hidrofóbica foram compostas por terra crua, óleo de cozinha já utilizado ou o aditivo de hidróxido de sódio. No primeiro caso, com o uso do biopolímero, a mistura apresentava menor absorção de água em comparação com uma mistura contendo o aditivo. Entretanto, a mistura com aditivo tinha uma absorção de água semelhante ao concreto, demonstrando um bom desempenho em comparação às argamassas terrosas convencionais sem uso de aditivos (Camões et al., 2012).

Já em Eires et al. (2017) foi investigado o uso de diversos materiais hidrofóbicos em composições à base de terra crua, um destes componentes testados foi o óleo de cozinha utilizado. Neste estudo foi possível observar que o óleo de cozinha apresenta uma ótima resposta para repelir a água, posto que em duas das suas amostras com o óleo se obteve uma redução da absorção de água em 76% e 69%. Entretanto, neste estudo foi encontrado uma proliferação de fungos em algumas amostras com óleo. Indicando uma preocupação para sua aplicação em ambientes constantemente húmidos (Eires et al., 2017).

Na investigação elaborada por Vital et al. (2017) os autores identificaram também que o cacto (*opuntia ficus-indica*) apresenta um papel impermeabilizante em paredes feitas à base de terra, ao serem inseridos em sua superfície através de uma tinta ecológica. Em Beas (1991), o uso do cacto na superfície de uma parede de terra polida ajuda na resistência à água (Camões et al., 2012). Além disso, em Beas (1991) é apresentado um estudo com aplicação do cacto na América do Sul, com uma proporção do seu extrato inserido em argamassas, sendo constituído por: 350g da polpa do cacto imerso em 0,5lt de água por 24h.

No estudo desenvolvido por Qu et al. (2021) foi possível obter uma mistura hidrofóbica, composta por água, cimento e areia, além de apresentar uma maior repelência à água devido a inserção de microrganismos hidrofílicos, em particular bactérias *Bacillus subtilis*. Esta bactéria aumenta o tempo de pega da composição e apresenta a capacidade de aumentar a durabilidade do material, visto que uniformiza a matriz da composição, de forma a diminuir os vazios.

A utilização de materiais hidrofóbicos em composições de argamassas destinadas para a impressão 3D é recente, mas é possível compreender que existe a aplicação dos mesmos em diferentes tipos de técnicas. Assim, a busca por misturas distintas que apresentam o uso de compostos naturais repelentes à água, serve de base para o aumento do conhecimento necessário para o aprimoramento de um material terroso, com alta vulnerabilidade à humidade.

Tabela 05 – Materiais repelentes com aplicação na construção.

Autor	Materiais de repelência a água
Camões et al., (2012).	Cal-pozolanas, cal hidratada com óleo, esterco, palha, cacto (<i>opuntia ficus</i>), látex, dammar, sangue animal, hidróxido de sódio; Biopolímeros (óleo de cozinha já utilizado) e o aditivo de hidróxido de sódio;
Eires et al. (2017)	Óleo de cozinha usado;
Vital et al. (2017)	Cacto (<i>opuntia ficus</i>);
Beas (1991)	Cacto (<i>opuntia ficus</i>);
Qu et al., (2021)	Bactérias (<i>Bacillus subtilis</i>);

2.4.5 Argamassa com reutilização de material

Na perspetiva da promoção da sustentabilidade, pesquisas são desenvolvidas com o intuito de encontrar soluções tanto para a diminuição da produção de CO₂, quanto para a reutilização de materiais sem destino final, de modo a introduzir novos valores ao estudo de design de material dentro da contemporaneidade. A Ellen MacArthur Foundation (n.d.) apresenta este conhecimento de forma acessível, expondo a demanda na atualidade pela economia circular. Este processo de ciclo fechado de consumo, consiste em eliminar os resíduos, através da reutilização dos mesmos, de forma a promover a regeneração da natureza e a diminuição dos danos climáticos provenientes da poluição (Ellen MacArthur Foundation, n.d.). Neste sentido, o estudo da aplicação deste conceito na formulação de argamassas para o setor da construção se faz pertinente para esta dissertação.

Dentro da perspetiva de reaproveitamento de resíduos, na Suécia é possível

encontrar a reutilização de 90% dos materiais descartados pelo setor da construção. Especificamente, com o concreto e os tijolos, gerando agregados graúdos, a madeira sendo reintegrada, e o vidro utilizado na produção de lâ mineral. Assim, esta reciclagem promove uma diminuição nas taxas de emissões de CO₂, provenientes de resíduos de um dos setores mais poluentes da atualidade (Thormark, 2001).

Em consonância a estes valores sustentáveis de reuso de resíduos, Eires et al. (2017) apresentam a aplicação do óleo de cozinha já utilizado em argamassas à base de terra. A aplicação deste material se destaca por ser um resíduo doméstico disponível em abundância. Além disso, como referenciado anteriormente, o uso deste material apresenta um potencial de hidrofobia para a mistura desenvolvida (Eires et al., 2017). Assim, o uso do óleo promove melhorias no desempenho da mistura e diminui a produção de resíduos do mundo.

Ademais, os autores Faleschini et al. (2023) apresentam em sua investigação a aplicação do pó de mármore em uma composição à base de terra crua. A inserção deste material vai ao encontro com o presente tópico 2.5.5, uma vez que o pó de mármore é um resíduo do setor industrial. Segundo Pêgo et al. (2023, p. 42), o pó de mármore é um detrito resultante do processo de corte do mármore. Para Rodrigues et al. (2015) o resíduo gerado na indústria de mármore representa cerca de 80% do recurso natural extraído (Ribeiro, 2023). Com base no levantamento realizado pelo “XXXI Relatório mármore e pedra do mundo”, a taxa de produção deste desperdício vem crescendo exponencialmente desde 2010. Em 2019, o resíduo gerado durante o trabalho fabril com o mármore resultou em uma taxa de 167.500 toneladas (Montani, 2020). Assim, estes dados demonstram uma necessidade industrial de se gerar uma finalidade para este atual material de descarte. Além disso, esta demanda aumenta à medida que o resíduo sem aplicação pode ser prejudicial para a saúde humana (Ribeiro, 2023, p. 34).

Além da utilização dos materiais apresentados anteriormente, Rocha et al. (2021) destacam a importância da reciclagem de materiais orgânicos. Os autores utilizaram a casca de ovo e a vinhaça (subproduto da produção do álcool) que seriam destinados a aterros, como materiais incorporados em composições de argamassas. Por meio desta investigação, os pesquisadores constataram ótimas qualificações de resistência à compressão mecânica na composição, proveniente da aplicação destes resíduos na terra crua (Rocha et al., 2021). Desta forma, este estudo demonstra que o uso de resíduos sem destino final produzidos pela indústria, pode exercer um potencial tanto para a sustentabilidade do meio ambiente quanto para o aumento da qualidade de um material.

Tabela 06 – Síntese dos materiais reutilizados no setor da construção civil.

Autor	Materiais de reuso ou reutilizáveis
Thormark (2001)	Tijolos; Concreto; Madeira; Vidro;
Eires et al. (2017)	Óleo de cozinha usado;
Rocha et al. (2021)	Casca de ovo; Vinhaça;
Faleschini et al. (2023)	Pó de mármore;

2.5 Pesquisa de Mercado

Com base nas análises e revisões realizadas anteriormente, foram identificadas algumas lacunas e potenciais na aplicação da impressão 3D com utilização de terra crua. Assim, a “Pesquisa de Mercado” se propõe em explorar e analisar a atual disposição do mercado, de forma a relacionar as técnicas utilizadas nos projetos pesquisados, com a proposta da dissertação.

A busca pelo uso da impressão 3D com aplicação da terra crua dentro do mercado é efetuada através de um levantamento em plataformas de pesquisa online. Esta investigação inclui produtos consolidados no mercado e projetos acadêmicos que se vinculam à temática percorrida. As interpretações destes projetos direcionam os próximos passos para o desenvolvimento da dissertação. Além disso, apresentam possibilidades de atuação e estudo sobre a utilização do material terroso na fabricação aditiva.

Deste modo, a pesquisa buscará identificar tendências e padrões no processo de impressão de argamassa, com compreensão sobre o método de preparação do material, processo de impressão e acabamentos. Para além, busca-se compreender as técnicas que podem ser associadas à impressão 3D, de modo a consolidar uma perspectiva mais abrangente sobre a prática da fabricação aditiva na área do design e da arquitetura.

Esta análise do mercado tende a fomentar a obtenção de insights, baseados em atuações eficazes no quesito de durabilidade do material, estética e potenciais que cada mistura apresenta. Assim, a pesquisa se estabelece com uma base do comportamento do material, das oportunidades e dos desafios que são dispostos na produção AM, com atuação no setor do design e da arquitetura.

Solar Sinter

A proposta foi realizada pelo designer Markus Kayser no ano de 2011 durante o curso de mestrado em Design Products, ministrado pela instituição

Royal College of Art (Kayser & Royal College of Art, 2011). Com a finalidade de explorar o potencial de geração de energia limpa, o projeto foi desenvolvido através do uso da incidência da luz solar, com um papel de impressora 3D por sinterização e a areia como matéria-prima. A escolha do material se deu em razão da abundância do mesmo na região que foi introduzido o projeto, Marrocos, Egito (Etherington, 2011).

O processo de fabricação decorre da incidência de feixes de luz (1 600 °C) que incidem sobre o material (areia de sílica), em conjunto uma bandeja de areia cobre o modelo impresso para a sinterização de novas camadas subsequentes, resultando em uma composição com aparência vidrada (figura 21) (Etherington, 2011).

O projeto demonstra o potencial de uma produção que utiliza energia limpa, além de enfatizar o papel sustentável do projeto ao se optar pela utilização da areia, um material abundante na região. Ademais, é válido considerar sua aplicação atual, de forma a necessitar de estudos para o uso da tecnologia em impressões em grande escala.

Além disso, visto a dependência do reservatório do material para a execução da impressão (figura 22), associa-se que quanto maior o produto para ser impresso, maior terá de ser a caixa de depósito, de maneira a se questionar a possível aplicação em projetos de maiores dimensões. Todavia, a exposição deste exemplo de produção incide no desenvolvimento de novas técnicas para o setor.

WASP

"We're not so crazy to think we can save the world, but we're crazy enough to work for it" - Massimo Moretti

A WASP é uma empresa de fabricação de impressoras 3D fundada na Itália em 2012, que se inseriu no mercado com a impressora PowerWASP. Inicialmente o objetivo da instituição era auxiliar o público, através da disponibilização de uma impressora 3D económica e diversificada, que atendesse mais de um material (WASP, n.d.).

Posteriormente, nos anos 2015, 2016 e 2018, a empresa se voltou para solucionar uma nova ramificação da indústria, com o desenvolvimento de equipamentos destinados à impressão 3D em grande escala, visando suprir o mercado de habitação. Assim respetivamente, lançou-se ao ramo a impressora Big Delta, para construções de até 12 metros de altura. Em seguida, disponibilizou as impressoras Maker Economy Starter Kit e Crane WASP, que se integraram a um sistema de colaboração capaz de imprimir edificações (WASP, n.d.). Por meio deste alcance, a WASP se desenvolveu na ramificação de testes de impressões em grande escala com uso de terra crua.

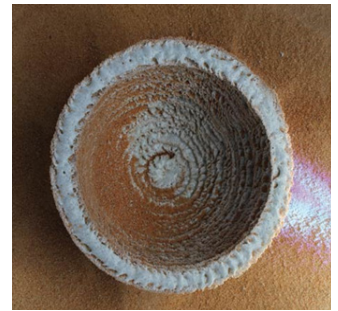


Figura 21 – Impressão realizada pela Solar Sinter (Etherington, 2011).



Figura 22 – Processo de impressão realizado pela Solar Sinter (Etherington, 2011).

Casa Gaia

A Casa Gaia é a primeira criação de edificação impressa em 3D com uso da terra crua criada pela empresa WASP, com a utilização da impressora Crane WASP, o projeto foi inaugurado em 6 de outubro de 2018 em Via Castelletto, Massa Lombarda (Chiusoli, 2018). Este projeto se tornou inovador, ao compilar as novas tecnologias, a arquitetura e a utilização de matérias naturais, neste caso a terra e fibra.

A construção possui um ótimo desempenho térmico, em função da geometria (figura 23), espessura da parede de 40cm e do material utilizado. Constituído por uma mistura de 25% de solo local, este com composição em 30% de argila, 40% de silte e 30% de areia; 65% de fibra, proveniente de 40% de palha do arroz (fornecido pelo RiceHouse) e 25% do descarte da casca do arroz; 10% de cal. Além disso, a parte interna da parede da edificação conta com uma camada de óleo de linhaça, que favorece o acabamento estético e proteção contra intempéries (Chiusoli, 2018).

Este primeiro projeto de impressão de casa totalmente natural, além de ser um marco para a WASP, representa uma oportunidade para o mundo. Visto que, o tempo de construção foi de apenas 10 dias, com um custo total de 900€ (Chiusoli, 2018). Desta forma, o projeto reforça o potencial do uso da impressão 3D com técnicas vernaculares, com aplicação de materiais sustentáveis, locais e de baixo custo.



Figura 23 – Casa Gaia (Chiusoli, 2018).

Staircase - programa de ensino OTF (Open Thesis Fabrication)

Com o grande impacto positivo do projeto Gaia, criou-se uma associação entre a WASP e o IAAC. Juntos, através de um programa de ensino OTF (Open Thesis Fabrication) investigaram o método de fabricação aditiva com uso da terra crua, com a finalidade de compreender as possibilidades das novas tecnologias dentro do setor da construção civil (Chiusoli, 2019).

O desenvolvimento desse estudo resultou em um protótipo de uma parede, com os mesmos 40 cm de espessura que existem na casa Gaia. Esta dimensão utilizada serviu de estrutura para a implementação de uma escada, demonstrando a potencialidade de suporte de carga de uma parede feita à base de terra, composta por uma mistura de argila e fibra de arroz com o uso da impressora 3D Crane WASP (figura 24) (Chiusoli, 2019).



Figura 24 – Impressão 3D com uso de terra crua realizada pela WASP e IAAC (Chiusoli, 2018).

TECLA

Durante o período de 2019 a 2021, a WASP realizou uma parceria com o escritório MCA (Mario Cucinella Architects), projetando um novo modelo de habitação neutro em carbono, com a utilização da terra crua local e de um conjunto de impressoras Crane WASP em funcionamento simultâneo. O projeto TECLA (figura 25) foi implementado na Itália, na proximidade de Bolonha, constituído por um total de 350 camadas de material extrudado durante 200 horas de funcionamento da impressora 3D (WASP & Mario Cucinella Architects, 2021).

O uso da terra crua como matéria-prima neste projeto apresentou um papel fundamental, de modo a alcançar uma função estrutural tanto nas paredes quanto na composição da cobertura. Além disso, a utilização da impressora 3D impulsionou a flexibilidade na geometria desenvolvida para o projeto TECLA, apenas com a restrição da área predefinida de abrangência da Crane WASP (WASP & Mario Cucinella Architects, 2021).



Figura 25 – Projeto TECLA (WASP & Mario Cucinella Architects, 2021).

TOVA

Consecutivo ao projeto anterior, foi reintegrada a conexão entre a WASP e IAAC no desenvolvimento do projeto TOVA (figura 26), em 2022. O projeto apresentou a finalidade de exportar a tecnologia de impressão 3D da empresa italiana para a Espanha. Desta forma, é possível compreender a disponibilização da WASP em globalizar a nova tecnologia, de maneira a enfatizar a sustentabilidade e integrar a um contexto social local. Recriando uma perspectiva para o setor da construção civil, se dispendo mais sustentável ao se vincular com a industrialização 4.0 na contemporaneidade.

A estrutura do projeto TOVA foi idealizado pelo IAAC e implantado na proximidade de Barcelona. Esta proposta teve destaque na região, por conta da sua materialização e por não gerar resíduos. Além disso, o projeto em questão buscou alternativas para promover uma maior durabilidade do material utilizado (terra crua, babosa, clara de ovo e enzimas locais), estas foram a introdução de uma fundação em geopolímero, cobertura de madeira com beirais prolongados para proteger as paredes impressas (Severi, 2022).

Assim, este projeto ressalta a importância que existe em promover alternativas para a disseminação de técnicas construtivas inovadoras e sustentáveis. Além de apresentar a pertinência da busca por argamassas

terrosas com maior durabilidade às intempéries da natureza, tendo em vista que parte da disposição do material utilizado no projeto foi implementado em decorrência da vulnerabilidade da terra crua à chuva.



Figura 26 – Projeto TOVA e uso do solo como matéria-prima para impressão 3D (Severi, 2022).

“IKEBANA ROCK’N’ROLL”

A WASP se apresenta de forma ativa no setor da AM, desta forma também desenvolveu projetos de menores escalas em parceria com artistas plásticos e designers. Uma destas associações foi realizada com o objetivo de compreender a compatibilidade da impressão 3D, com uso de materiais naturais como a argila.

O projeto “IKEBANA ROCK’N’ROLL” (figura 27) foi realizado em uma parceria entre a WASP e o Andrea Salvatori, através de experimentações artísticas sobre o diálogo entre o avanço tecnológico e atividades artísticas seculares. Este produto contou com o uso da argila e da impressora 3D Delta WASP 40100 Clay, sendo exposto no The Pool NYC em Milão (Chiu-soli, 2019b) (Salvatori, 2011).

O projeto dispõe de uma proposta que se desafia a unir variados métodos de produção para compor o produto, através do uso de técnicas manuais e de impressão 3D. Assim, este enfatiza o potencial existente em inserir processos contemporâneos em conceitos vernaculares, vice-versa. Além disso, este projeto se destaca no contexto da dissertação ao testar o potencial geométrico de um material com base argilosa e uma viscosidade próxima ao utilizado na impressão 3D com terra crua, podendo influenciar no desenvolvimento de estudos e fomentar novas perspectivas para a produção geométrica.



Figura 27 – Andrea Salvatori em meio a produção do “IKEBANA ROCK’N’ROLL” (Chiu-soli, 2019b).



Figura 28 – Pilar desenvolvido no Workshop Pylos (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2016).

Workshop Pylos

Desenvolvido com base em pesquisas de ex-alunos do Institute for advanced architecture of Catalonia (IAAC), o Workshop destinou-se ao estudo da impressão 3D, com uso da argila para aplicação no setor da arquitetura. Por meio de testes de aplicação em escala real do material, o foco do grupo de pesquisadores foi otimizar o design ao máximo para melhorar a viabilidade do uso da matéria-prima (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2016). A pesquisa identificou uma série de necessidades para se obter a melhor geometria na impressão 3D com uso de material terroso, de forma a demonstrar a existência de uma demanda de estudo na vertente.

Assim, durante o Workshop a equipe de pesquisadores dividiu-se em grupos, obtendo como resultado quatro estudos de formas distintas e um acúmulo de informação essencial. Resultante das pesquisas desenvolvidas, foi possível adquirir a prototipagem de um pilar escultórico (figura 28), com uma geometria complexa que apenas se configurou através do uso da impressão 3D (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2016).

TerraPerforma

Além das parcerias desenvolvidas entre a IAAC e WASP, o Institute for advanced architecture of Catalonia - Barcelona, desenvolveu uma série de projetos. Um destes é o programa TerraPerforma, ministrado pelos diretores Edouard Cabay e Alexandre Dubor em 2017.



Figura 29 – Projeto desenvolvido no programa TerraPerforma (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2017)

A TerraPerforma foi criada com o objetivo de promover o conhecimento sobre a impressão 3D em grande escala, além de aplicar a terra crua como material base (figura 29). Este projeto promove o conhecimento sobre a utilização do material terroso e propaga o avanço das novas tecnologias, de forma a mesclar a indústria 4.0 com as técnicas vernaculares (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2017).

A pesquisa realizada se direcionou em uma busca pela otimização do design de material, devido a vulnerabilidade do material em detrimento de fenômenos climáticos. Dessa forma, durante o desenvolvimento do TerraPerforma foram realizados testes, através de simulações sobre o impacto do vento, sol e o comportamento estrutural do material (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2017).

Além disso, em decorrência das análises realizadas durante os avanços do projeto, observa-se que foi selecionada a separação da geometria única e complexa em módulos, de forma a auxiliar na flexibilidade da montagem para compor a parede (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2017).

Openings in 3D printing with earth

O projeto Openings in 3D printing with earth foi desenvolvido pelo IAAC, com o objetivo de explorar o potencial geométrico existente no processo de fabricação aditiva. O estudo da geometria se estendeu sobre uma análise do potencial de criação de aberturas de janelas através da impressão 3D, com o uso de um material terroso (figura 30) (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2020).



Figura 30 – Aberturas para janelas em projetos com impressão 3D, Openings in 3D printing with earth (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2020).

Este estudo utilizou uma impressora Delta e um braço robótico de 6 eixos, com aplicação da argila como material base, extrudado em camadas de 4 mm de espessura e 20 mm de largura. A impressão apresentou um tempo delimitante de 18 horas, em 5 dias, resultando em uma estrutura com um peso de 252 kg. Este volume é proveniente da compactação das camadas e do alto percentual de material inserido para atingir a geometria desejada (Institute for advanced architecture of Catalonia, 2020).

GCODE.Clay

O grupo de designers e arquitetos que compõem o Emerging Objects, buscam desenvolver o uso da impressão 3D na arquitetura. Além disso, realizam estudos sobre uso de materiais naturais na fabricação aditiva, desenvolvendo uma relação aprofundada entre tecnologia e técnicas vernaculares (Emerging Objects, 2023).

O projeto GCODE.Clay visa se inserir no mercado com a utilização da tecnologia de impressão 3D em conjunto ao uso da argila, destacando-se pela sua geometria única e atuação em obras de arte de pequena escala (Fratello, 2016). Os produtos desenvolvidos são produzidos através da impressão 3D, se distanciando de padrões de formas ortogonais sobrepostas linearmente, de maneira a interagir com a gravidade, viscosidade do material e tempo de cura do mesmo.

Através deste projeto é possível identificar que a componente estética obtida no GCODE.Clay (figura 31) foi potencialmente desenvolvida para analisar a capacitação entre a interação do meio com a obra. Assim, os aspectos de detalhes inscritos nas superfícies demonstram a capacidade estética que o material terroso pode alcançar, além de obter texturas distintas e promover sensações táteis únicas.



Figura 31 – Composição de fotos dos produtos desenvolvidos para o projeto GCODE.Clay, (- Jay R., as cited in Fratello, 2016).

Mud Frontiers: Part II

O Mud Frontiers: Part II foi desenvolvido pelo grupo Emerging Objects, com o objetivo de realizar uma combinação entre as tradições vernaculares e as técnicas de produção contemporâneas. O projeto se apresenta com uma escala arquitetônica, e é composto por uma estrutura que contém 4 funcionalidades, determinadas pelos autores da obra como: Hearth, Beacon, Lookout e Kiln (figura 32) (Emerging Objects, 2019). Segundo os autores e pela percepção das imagens é possível identificar que esta divisão segue a seguinte justificativa:

- Beacon: se apresenta através do reflexo da iluminação inserida do projeto e sua refração na geometria obtida pela impressora 3D;
- Hearth: é encontrada em um possível momento de descanso internamente ao projeto;
- Lookout: é obtida com a inserção de uma escada impressa em 3D com a composição de adobe;
- Kiln: retoma técnicas de queimas de cerâmicas seculares, com a inserção de lascas de madeira e realização da queima de potes cerâmicos, que também foram desenvolvidos em impressoras 3D com argila micácea.

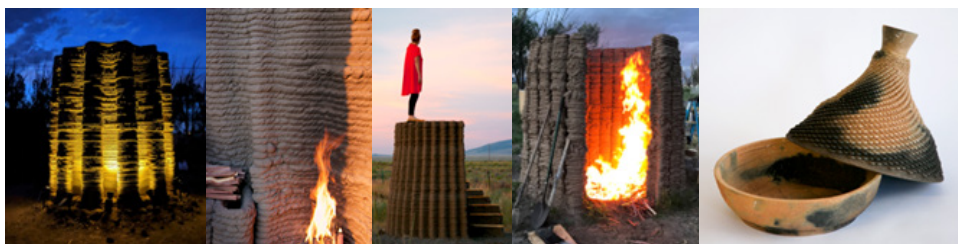


Figura 32 – Composição de imagens que descrevem o projeto Mud Frontiers: Part II (Emerging Objects, 2019).

O produto resultante se insere em uma região de relva e natureza no Estado do Colorado, de modo a comportar o uso da argila, água e palha de trigo, visto a abundância do material no local. Além disso, em alinhamento com os objetivos previstos anteriormente, o projeto foi produzido por meio do uso de uma impressora 3D por extrusão, criada pela própria empresa Emerging Objects (Emerging Objects, 2019).



Figura 33 – Processo de impressão do projeto Mud Frontiers: Part II (Emerging Objects, 2019).

Para compor esta estrutura em escala arquitetônica os autores do projeto idealizaram as paredes impressas em uma geometria orgânica única. Além disso, incorporaram pedaços de madeira de zimbro entre algumas camadas de filamento, de modo a auxiliar na resistência da estrutura (Emerging Objects, 2019). Ademais, ressaltando que a escolha da forma impressa (figura 33) garante um efeito de proteção térmica.

Casa Covida

A Casa Covida (figura 34) foi desenvolvida durante a pandemia do covid-19, como um resgate das origens indígenas e suas casas feitas a base de terra crua. O projeto é localizado em San Luis Valley, no Colorado, e conta com o emprego de materiais locais (Emerging Objects, 2020).



Figura 34 – Composição de imagens que descrevem o projeto Casa Covida (Emerging Objects, 2020).

O projeto comporta a estrutura de uma casa setorizada em três espaços: lareira, dormir e banho. Os ambientes projetados são inscritos em uma planta baixa circular, obtida através da liberdade volumétrica proporcionada pela impressão 3D (Emerging Objects, 2020). De modo a demonstrar a flexibilidade em se construir com as novas tecnologias, a impressora utilizada se associa a um robô de 3 eixos, com capacidade de impressão em escala arquitetônica. Além disso, em conjunto se utilizou um software desenvolvido pela própria empresa para impressão de cerâmica, de maneira a facilitar o desenvolvimento de produção in loco (Pintos, 2022).

Future Archeologies

A equipe de projeto da empresa Emerging objects desenvolveu em 2022 uma ideia inovadora de tijolos. Esta proposta buscou resgatar conhecimentos históricos para a atualidade, através do uso da argila local e da produção por meio da impressão 3D (Emerging Objects, 2022b).

A geometria e a estética dos tijolos foram desenvolvidas através da utilização do software de impressão 3D, “Potterware”, criado pela empresa Emerging Objects. Este programa computacional destina-se a facilitar a criação de textura em impressões de materiais com a viscosidade semelhante da argila (Emerging Objects, 2022b).

Este projeto foi exposto no Instituto Superior de Indústria Artísticas na Itália, através desta apresentação se identifica a versatilidade do objeto desenvolvido (figura 35). A sua disposição no ambiente ressalta o potencial estético do Future Archeologies, procedente da liberdade geométrica na



Figura 35 – Disposição dos tijolos Future Archeologies (Emerging Objects, 2022b).

fabricação aditiva. Nesta produção, o projeto fez uso de dois tipos de argila, a argila branca tingida e a argila Red Velvet, encontrada na Califórnia (Emerging Objects, 2022a). Além disso, a inserção do uso de materiais locais e com cores distintas ressalta o potencial estético do material terroso e suas diversificações.



Figura 36 – Divisória de ambiente em impressão 3D, Projeto HIVE, desenvolvido pela equipe da Universidade de Waterloo, foto feita por David Correa(Prieto, 2022)

HIVE

Em 2021 o projeto HIVE se estabeleceu no campo da investigação, com pesquisas relacionadas às propriedades das argilas destinadas para uso na impressão 3D. Esta análise se fundamentou em compreender o potencial de fluidez e trabalhabilidade do material, além de selecionar a melhor geometria para a fabricação aditiva (Prieto, 2022).

O projeto em questão foi desenvolvido por uma equipe da Universidade de Waterloo (Ye Sul E. Cho, Ji Shi, Meghan Taylor, James Clarke-Hicks, Isabel Ochoa e David Correa), através de uma parceria com Investment Management Corporation of Ontario, SDI Interior Design e Masonry Works Council (The University of Waterloo, 2022).

O desenvolvimento do HIVE reforça a combinação entre técnicas tradicionais de produção de cerâmica e a fabricação aditiva. O resultado desta fabricação é a criação de uma parede divisória (figura 36), obtida através da impressão 3D de 175 módulos, que ao se unirem formam uma composição geométrica complexa semelhante ao favo de mel (The University of Waterloo, 2022). De modo a alcançar uma estrutura resultante que alcança uma dimensão de 2,3m x 5,4m (Prieto, 2022).

“Soil Inks”



Figura 37 – Processo de impressão 3D do projeto Soil Inks Ehsan Baharlou (Aouf, 2022).

O projeto “Soil Inks” (figura 37) consiste em uma argamassa sustenável, desenvolvida por um grupo de pesquisadores da University of Virginia. Este material produzido tem como objetivo promover um melhor conforto térmico na arquitetura e auxiliar na absorção de águas provenientes de enchentes (Aouf, 2022).

Para o desenvolvimento do projeto, os pesquisadores utilizaram um sistema de braço robótico de largo alcance e uma extrusora (Walker, 2022). Em conjunto, realizaram algumas testagens do material, como a avaliação da extrudabilidade do mesmo. Estes testes realizados serviram para fundamentar a melhor opção de mistura para a fabricação aditiva, além de identificar características básicas das argamassas terrosas, como a descoberta de que as composições com maior teor de argila apresentam mais fissuras ao secar, tornando-as vulneráveis à erosão (Barnes et al., 2022).

Assim, o projeto “Soil Inks” se alinha com a busca da dissertação, ao compreender as necessidades do meio ambiente que se insere, e utilizando materiais locais de baixo impacto ambiental, favorecendo a promoção dos avanços sustentáveis no setor da construção civil.

Lovely Trash Column

O projeto é composto por uma coluna impressa (figura 38) em Londres no ano de 2020. Esta obra se constitui por meio de módulos desenvolvidos através de um software de modelação tridimensional, com base em algoritmos criados pela própria empresa (Blast studio, 2020). A proposta desenvolvida pelo Blast Studio se insere no contexto da fabricação aditiva com o uso de materiais recicláveis, com uma mistura a base de micélio e copos de papel que seriam para descarte, triturados e esterilizados (Hahn, 2022).

A proposta da equipe de designers além de identificar o potencial existente na impressão com uso de materiais recicláveis, promove o conhecimento sobre o uso do micélio na impressão 3D, como também uma fonte de produção alimentar. De modo a auxiliar mais de um setor económico, além de prevê que as raízes do micélio auxiliam como suportes para a estrutura, e apresentam um mecanismo de defesa contra o fogo (Hahn, 2022).



Figura 38 – Pilar impresso com uso de materiais reciclados (Blast studio, 2020).

Pavilhão dos Emirados Árabes Unidos

O Pavilhão foi desenvolvido para a Floriade Expo 2022 na Holanda, através de uma parceria entre o escritório Pragma e o Aectual, este projeto (figura 39) uniu a tradição arquitetónica dos Emirados Árabes e com os avanços tecnológicos. Além disso, esta produção promoveu uma arquitetura sustentável, ao utilizar um bioplástico à base de plantas (Aectual, 2022).

Com base neste projeto é identificado o potencial da impressão 3D em grande escala, além da flexibilidade em se obter um design único e sob demanda. Desta forma, esta análise torna-se uma referência para produção arquitetónica e de design, os quais visam auxiliar o crescimento tecnológico do setor da construção.



Figura 39 – Fachada do Pavilhão dos Emirados Árabes Unidos impresso em 3D (Aectual, 2022).

3D-Printed Habitat Competition NASA - MARSHA

O projeto foi desenvolvido em resposta a um desafio proposto pela NASA, que consistia na criação de um projeto arquitetónico que se aplicasse como uma habitação em Marte. Neste contexto o grupo AI SpaceFactory classificou-se como a primeira colocada, através da produção do projeto MARSHA (figura 40) (Walsh, 2019).

A escolha do uso da fabricação aditiva (figura 41) para o projeto MARSHA dispõe de facilidades para a construção em outro planeta, visto o potencial de ser produzido sem a presença humana (AI SpaceFactory, n.d.). Para o uso desta tecnologia se aplicou o uso de materiais naturais de Marte, como um composto a base de basalto e um bioplástico renovável à base de planta (Walsh, 2019).



Figura 40 – Processo de impressão do projeto MARSHA da AI SpaceFactory reproduzida em (Walsh, 2019).



Figura 41 – Esquema de impressão 3D do projeto MARSHA (AI SpaceFactory, n.d.).

Airlements



Figura 42 – Processo de empilhamento das seções impressas, Patrick Bedarf (Bedarf et al., 2023)

Um grupo de pesquisadores do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETH Zurich) desenvolveu uma série de análises direcionadas à vertente da fabricação aditiva. O projeto Airlements se enquadra neste contexto, através da impressão 3D de blocos empilháveis (figura 42) com peso aproximado de 25 kg, que ao se unirem formam uma coluna não estrutural de até dois metros (Bedarf et al., n.d.)(Bedarf, 2023).

A produção deste projeto se baseia na utilização de resíduos industriais e espumas minerais à base de geopolímeros, de forma a enfatizar a importância de uma produção sustentável para o setor industrial (Bedarf et al., n.d.)(Bedarf, 2023).

Impressão 3D com pó de mármore

O projeto final de mestrado foi desenvolvido pela designer Elis Regina Ribeiro, na Universidade do Porto, sob orientação da professora Doutora Bárbara Rangel, coorientação do Doutor Joaquim Góis e do Mestre João Teixeira (Ribeiro, 2023).

Este projeto (figura 43) buscou estudar a valorização dos resíduos gerados pela indústria marmoreira, além de utilizar a fabricação aditiva para o desenvolvimento da produção do produto final. Além disso, a pesquisa visa ressaltar o baixo impacto ambiental deste método fabril através da utilização de resíduos (Ribeiro, 2023).

O material utilizado neste projeto é composto por uma mistura de cimento, areia, água e resíduo de pó de mármore (Ribeiro, 2023). Esta composição, na fabricação aditiva resulta em uma impressão 3D com boa extrudabilidade, além de validar o potencial do reuso de materiais, contribuindo para um design ecologicamente sustentável e inovador.



Figura 43 – Modelo impresso pela designer Elis Regina Ribeiro (Ribeiro, 2023).

Objetos de decoração com resíduos da construção civil

Projeto desenvolvido pela designer Mayra Deberg Alencar, durante o curso de mestrado em “Design Industrial e de Produto” da Universidade do Porto, sob orientação do professor Doutor Rui Mendonça. A proposta da autora visa auxiliar na diminuição de produção de resíduos da área da construção civil, por meio do reuso dos mesmos (Alencar, 2023).

O projeto enfatiza a importância de ressignificar o emprego dos resíduos gerados na construção civil, com aplicação nos mais diversos setores. Além disso, o mesmo reforça a relevância da aplicação de uma economia circular na produção industrial (Alencar, 2023). Deste modo, compreende-se que o papel de um designer está diretamente conectado ao processo de criação, seja de um novo material ou de um produto.

Assim, este projeto validou-se através do desenvolvimento de uma série de objetos de decoração (figura 44), produzidos por meio da fabricação por moldes. Estes produtos foram gerados mediante a separação e seleção de materiais de descarte da construção civil, como cimento, pó de granito, tijolos e telhas cerâmicas, mármore, granito e vidro, para posterior reaplicação no mercado (Alencar, 2023).



Figura 44 – Protótipo desenvolvido com resíduos da construção pela designer Mayra Deberg Alencar (Alencar, 2023).

Síntese do mercado

O mercado estabelece parâmetros para os próximos passos deste estudo, de modo a evidenciar que a aplicação da impressão 3D com terra é recente, visto que a primeira fabricação em grande escala com este material remonta a 2018. Além disso, através de uma análise dos projetos (figura 45), por meio da leitura da tabela 07, identificou-se que grande parte destas obras foram obtidos através do método de extrusão, apresentando características de produção particulares e dispondo de uma fabricação mais ecológica, com a aplicação de materiais sem grandes emissões de poluentes ou com a incorporação de compostos recicláveis/reuso.

O aumento da disseminação mundial do uso do solo já é observado na análise de mercado, visto que é possível identificar a aplicação da técnica em diversas localidades. A compreensão de que este método de produção está se inserindo em um contexto globalizado, faz com que criemos uma percepção mais abrangente das necessidades gerais e locais, já que é uma produção que utiliza materiais preferencialmente do lugar, como a terra crua, de modo a evitar a disseminação excessiva de CO₂.

Entretanto, com uma investigação mais aprofundada, nota-se que as informações sobre a durabilidade destes materiais carecem de ampla disponibilidade, o que requer a consulta de documentos científicos e técnicas históricas para embasar o conhecimento e promover aperfeiçoamentos destas misturas à base de terra.

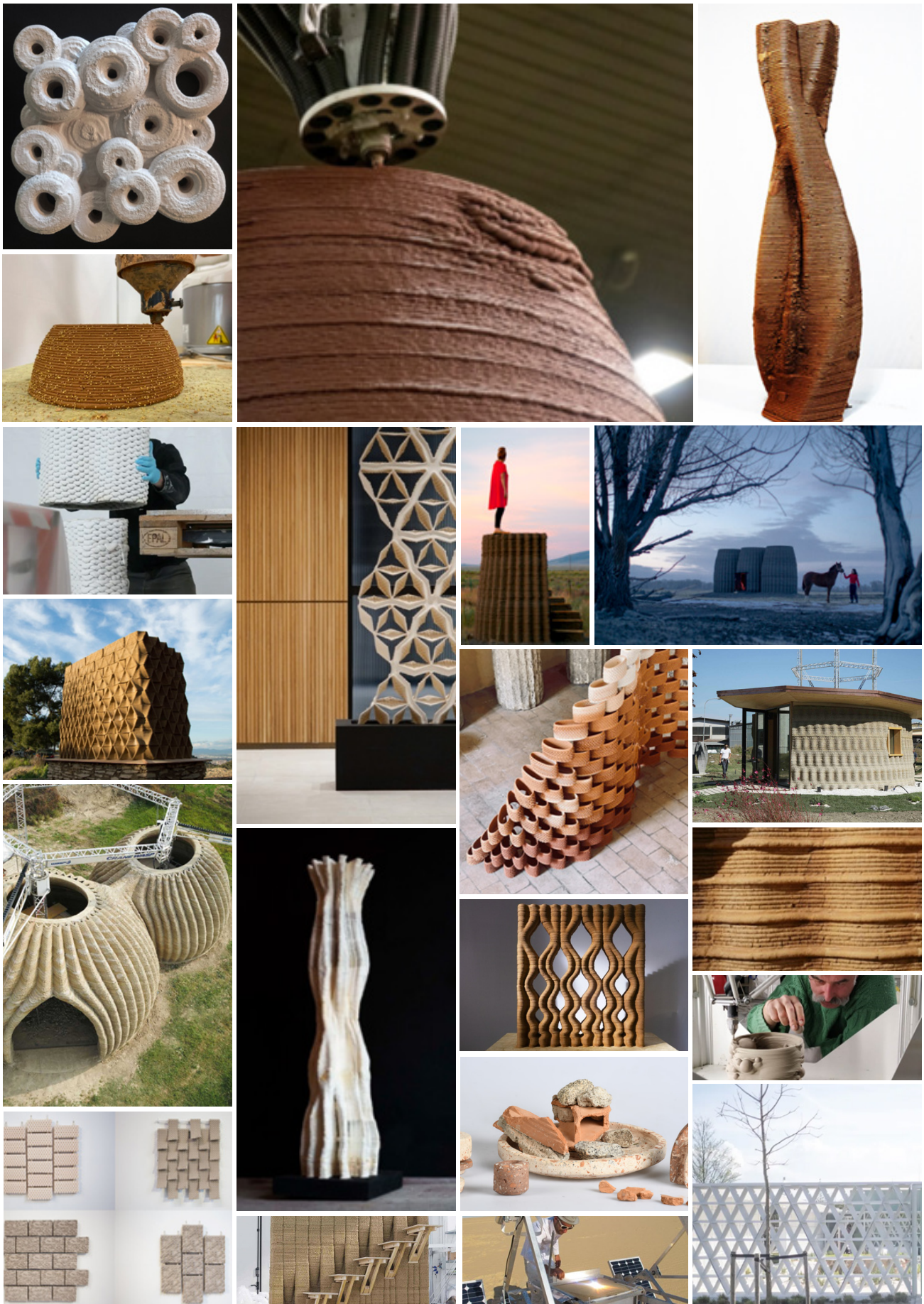
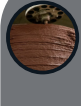


Figura 45 – Composição de figuras dos projetos analisados no Estado da Arte.

Impressão 3D com terra crua: A resignificação da aplicação do solo na arquitetura e no design contemporâneo

	Autor da obra	Local	Composição do material	Tipo de impressão 3D	Tempo de produção	Acabamento	Aspetos de durabilidade	Diferenciais	Escala*
 Solar Sinter 2011	Markus Kayser, Royal College of Art	Egito - Marrocos	Areia de sílica	Sinterização por luz solar	-	-	-	Produção sustentável, sem uso de energia finita	Pequeno
 Casa Gaia 2018	WASP	Via Castelletto, Massa Lombarda	25% de solo local, 40% de palha do arroz, 25% casca do arroz, 10% de cal	Extrusão – Crane WASP	10 dias	Óleo de linhaça para melhorar o acabamento estético e proteger contra intempéries	Apresenta o uso de óleo de linhaça para melhorar o acabamento estético e proteger contra intempéries	Proteção contra intempéries	Grande
 Staircase 2019	WASP, IAAC	-	Argila e fibra de arroz	Extrusão – Crane WASP	-	-	-	Uso do material terroso para suportar carga	Grande
 TECLA 2019 / 2021	WASP, MCA	Itália - Bolonha	Terra crua (sem detalhes da composição)	Extrusão – Crane WASP	200 horas	-	-	A obra impressa é a própria cobertura externa	Grande
 TOVA 2022	WASP, IAAC	Espanha	Materiais locais: mistura de terra, babosa (aloe vera), clara de ovo e enzimas locais	Extrusão – Crane WASP	-	-	Inserção de beirais para proteção do material terroso	Produção sustentável, sem gerar resíduos	Grande
 IKEBANA ROCK'N'ROLL 2019	WASP	Itália - Milão	Argila	Extrusora (Delta WASP 40100 Clay)	-	Vidrado (observado nas imagens)	-	Geometria obtida por diferentes técnicas de produção	Pequeno
 Workshop Pylos 2016	IAAC	Barcelona	Argila	-	-	-	-	Estudo da geometria	-
 TerraPerforma 2016-2017	IAAC	Barcelona	Terra crua	-	-	-	-	Estuda o potencial do uso da terra crua em impressão 3D	Médio / Grande
 Openings in 3D printing with earth 2019-2020	IAAC	Barcelona	Argila	Delta Printer	18h em 5 dias	-	-	Exploração do potencial geotérmico da impressão com terra crua	Grande
 GCODE. Clay 2016	Emerging Objects	-	Argila (porcelana, terracota e argila reciclada)	-	-	Vidrado (observado nas imagens)	-	Explora do detalhe na geometria	Pequeno
 Fronteiras de Lama: Parte II 2020	Emerging Objects	Colorado	Mistura de Adobe	Impressora 3D e braço robótico articulado em 3 eixos	-	-	-	Estuda diversas funções para um projeto impresso com aplicação da terra crua	Pequeno / Grande

	Autor da obra	Local	Composição do material	Tipo de impressão 3D	Tempo de produção	Acabamento	Aspetos de durabilidade	Diferenciais	Escala*
 Casa Covida 2020	Emerging Objects	San Luis Valley - Colorado, EUA	Argila, areia, água e palha	Extrusora com braço robótico de 3 eixo	-	-	-	-	Grande
 Future Archeologies 2022	Emerging Objects, Virginia San Fratello, Keisha Herrera	Faenza - Itália	Argila variada	Extrusora (sem especificação)	-	-	-	Criação de composição modular	Pequeno / Grande
 HIVE 2021	Universidade de Waterloo	Canada	Mistura de argila (sem especificação)	Extrusora (sem especificação)	-	-	-	Estudo da geometria	Grande
 Soil Inks 2022	Pesquisadores da University of Virginia	Virgínia, EUA	Mistura de terra (areia, silte e argila), sementes (semelhantes ao cacto), e água (teor maior que 30-35%)	Impressora Hyrel 3D Engine SR, com seringa de 150ml	-	-	Vegetação	Raízes da vegetação apresentam um comportamento de estruturação	Médio / Grande
 Lovely Trash Column 2020	Blast Studio	Londres, UK	Resíduos de copo de papel e micélio	Extrusora (sem especificação)	-	-	-	Utilização de resíduos para compor argamassa	Médio / Grande
 Pavilhão dos Emirados Árabes 2022	Pragma, Aectual	Amsterdã, Holanda	Bioplástico	-	-	-	-	Uso de material biológico, possível reutilização	Médio / Grande
 3D-Printed Habitat Competition NASA - MARSHA 2019	AI Space-Factory	Destino final Marte	Composto de basalto e bioplástico	Extrusora (sem especificação)	-	-	-	Pelo propósito de aplicação em Marte deve apresentar maior resistência pela imprecisão da atmosfera	Grande
 Airlements 2023	Digital Building Technologies team at ETH Zurich	Zurique	Espuma mineral e geopolímero	Extrusora - foam 3D printing (F3DP)	-	-	-	Capacidade de criar estruturas leves	Médio / Grande
 Impressão 3D com pó de Mármore 2023	Elis Regina Ribeiro	Porto, Portugal	25% de cimento, 17,5% de areias, 57,5% de pó de mármore e água	Extrusora - Delta WASP 40100	2 horas e 20 minutos	-	-	Valorização de resíduos	Médio / Pequeno
 Objetos de decoração com resíduos da Construção Civil 2023	Mayra Deberg Alencar	Porto, Portugal	20% de cimento, 30% de pó de granito, 18% de água + agregado (resíduos da construção civil)	Molde, uso de impressão para obtenção da forma desejada	-	-	Variados. Exemplo: polimento	Apresenta a valorização do uso dos resíduos da construção	Pequeno

*Escala do projeto (grande, pequena, média), com base em um exemplo das proporções respetivamente: arquitetónica, mobiliário e de utensílio.

2.6 Síntese do Capítulo

O estudo realizado fundamentou o contexto da aplicação da terra crua em processos de fabricação aditiva. Assim, para uma análise geral desta investigação, foi necessário compreender o impacto da temática na literatura científica, de forma a comprovar a existência de lacunas nesta área do conhecimento e possíveis oportunidades de estudo.

As análises das referências bibliográficas forneceram o embasamento necessário para explorar a possibilidade de conexão entre as técnicas vernaculares e as contemporâneas. Diversos estudos apresentados destacam o potencial de aplicação de argamassas à base de terra em um processo de fabricação aditiva, com a aplicação em específico do método de Material Extrusion. Além disso, estas investigações demonstram a necessidade de seguir alguns parâmetros para viabilizar a impressão 3D, como a fluidez adequada para a extrusão, a trabalhabilidade, o potencial de construção e a compreensão da interação entre geometria e material.

Para além disso, com a investigação foi possível compreender os materiais fundamentais utilizados no setor da manufatura aditiva com terra crua. Desta forma, as composições mais utilizadas consistem em misturas de terra, água e fibra, podendo também inserir componentes que potencializam a resistência do material, como a cal e o pó de mármore. O estudo também se concentrou em compreender as técnicas vernaculares e seus principais aspetos, identificando que a aplicação do solo na construção tradicional se apresenta secularmente, com um movimento atual para o seu aperfeiçoamento.

Em contrapartida, um dos fatores que impedem o uso disseminado da terra crua no setor da construção foi estudado no tópico Argamassas hidrofóbicas, o qual compreendeu a função de alguns materiais auxiliares para esta questão. Como no caso da aplicação de biopolímeros (óleo de cozinha utilizado), que além de repelir a água contribui para uma economia circular com a reutilização do material.

Em seguida, a investigação do mercado gerou insights ao identificar casos práticos que contribuem com os aspetos fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Além disso, esta análise sinalizou desafios associados à aplicação da terra crua na fabricação aditiva, como a escassez de informações técnicas sobre as composições e a vulnerabilidade do material à erosão. Assim, estas questões direcionam o estudo para uma busca pelo aprimoramento do material, como um contributo para o setor da arquitetura e da construção civil.

Impressão 3D com terra crua: A ressignificação da aplicação
do solo na arquitetura e no design contemporâneo



CAPÍTULO 3

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Introdução

Fundamentada na pesquisa desenvolvida anteriormente, a dissertação busca compreender o papel do designer dentro do setor da construção civil. Esse profissional assume a função de desenvolver soluções que não envolvem apenas a funcionalidade dos materiais, mas também incorpora aspectos inovadores, ergonômicos, estéticos e sociais, de modo a fornecer uma integração sustentável entre o ser humano e o ambiente. Assim, com uma perspectiva abrangente do cenário atual, é notável que o designer se insere neste contexto como um facilitador, promovendo opções de desenvolvimento socialmente, economicamente e ambientalmente sustentáveis, em resposta à degradação ambiental que é vivenciada na atualidade.

Deste modo, como o setor da construção civil é responsável por 30% da poluição mundial, o presente estudo dedica-se a desenvolver um design de material mais sustentável para o contexto de aplicação. Assim, visto o potencial do uso da terra crua como matéria-prima substitutiva para o setor, os próximos passos da investigação são pautados na análise e compressão da sua usabilidade na fabricação aditiva e na promoção da diminuição da degradação ambiental. De maneira que a aplicação do solo resgate a identidade local e a essência humana, através da relação existente entre o barro e as primeiras construções produzidas pelos seres humanos.

3.2 Pertinência do estudo

No contexto atual de altas taxas de emissões de CO₂, a adoção de um material mais sustentável torna-se necessária nos mais diversos setores industriais. Assim, o estudo visa aumentar a aceitabilidade do mercado em relação à aplicação da terra crua no setor da construção, através do seu aperfeiçoamento, uma vez que é um material com potencial para diminuir a pegada ambiental.

Ademais, como apresentado no segundo capítulo desta dissertação, M. Buson et al. (2024) realizaram a primeira investigação de aplicação da terra crua na fabricação aditiva em grande escala dentro do âmbito educacional da FEUP. Nesta investigação (First Impressions on Three-Dimensional Printing with Earth-Based Mortar at the Faculty of Engineering of the University of Porto), os autores também ressaltam a necessidade de se realizar estudos aprofundados sobre esta temática, enfatizando a pertinência da presente investigação.

3.3 Enquadramento

Esta dissertação se estabelece no âmbito do Mestrado de Design Industrial e de Produto da Universidade do Porto, ministrado pela Faculdade de Engenharia e pela Faculdade de Belas Artes. O seu desenvolvimento procedeu-se nos laboratórios de impressão 3D presentes no Departamento de Engenharia Civil e nas salas de estudo da Universidade do Porto.

Além disso, a pesquisa firma um diálogo com profissionais do setor, investigadores e com a empresa Havelar. Esta última tem como objetivo promover a inovação e a sustentabilidade em Portugal, com a aplicação da impressão 3D na indústria da construção civil, validando a necessidade do mercado em relação à fabricação aditiva. Assim, através destes diálogos identificou-se que o setor de aplicação do material é abrangente e necessita explorar o uso da terra na I3D, de modo a se alinhar com as necessidades ecológicas.

3.4 Objetivos

Em relação aos objetivos do Caso de Estudo desta dissertação, se espera promover o aprimoramento da aplicação da terra crua na impressão 3D, de modo a diminuir a sua vulnerabilidade ao entrar em contato com a água após a sua cura.

Além disso, como objetivos específicos se espera incentivar a aceitação do uso desta mistura à base de terra no setor da construção civil. A produção de um acervo de misturas à base de terra crua que apresentem um potencial de extrusão na impressora Delta WASP 40100, a aplicação de uma destas no desenvolvimento de um produto em escala reduzida e o seu teste de aplicação na impressora BE MORE Smart 3D, validando a sua usabilidade.

3.5 Resultados a alcançar

O resultado a ser alcançado por meio do “Caso de estudo” é o desenvolvimento de uma composição de argamassa à base de terra crua aprimorada, que seja de possível aplicação na fabricação aditiva, e que apresente uma melhoria na repelência à água.

3.6 Metodologia

A metodologia aplicada ao caso de estudo inspira-se no Material Driven Design, uma vez que este incentiva a exploração das propriedades dos materiais, a interação entre o desenvolvimento da composição e o designer, a definição das possibilidades e limitações presentes no material estudado

antes de o inserir em um produto, e compreende a importância do estudo aprofundado sobre o material aplicado. Como referido anteriormente no tópico 1.5 da dissertação, este método consiste em quatro principais etapas, sendo estas: o domínio do material em seus aspetos gerais, aplicação deste em ensaios, análise do conhecimento resultante e experimentação na criação de produto. Desta forma, compreende-se que os materiais são o início do processo de criação, e que devem ser estudados desde os seus aspetos sensoriais quanto os técnicos (Karana et al., 2015).

Assim, criando uma análise comparativa da aplicação do método MDD e desta dissertação, é possível identificar através do diagrama de método (figura 46) que o primeiro passo é encontrado através da investigação sobre a terra crua e os seus componentes a serem agregados às misturas desenvolvidas. No segundo passo são realizadas as experiências e caracterização técnica dos materiais, através dos ensaios de extrusão, absorção de água, mecânicos (flexão e compressão) e estético. No terceiro passo é indicado o teste com o usuário, todavia visto a necessidade de uma produção em escala real, a etapa foi sugerida para um estudo futuro. Para o quarto passo identifica-se a melhor mistura para a aplicação e a testa na impressora 3D, Delta WASP 40100, para comprovar o potencial de extrusão do material. Assim, valida-se o material escolhido através da sua aplicação no desenvolvimento de um produto.

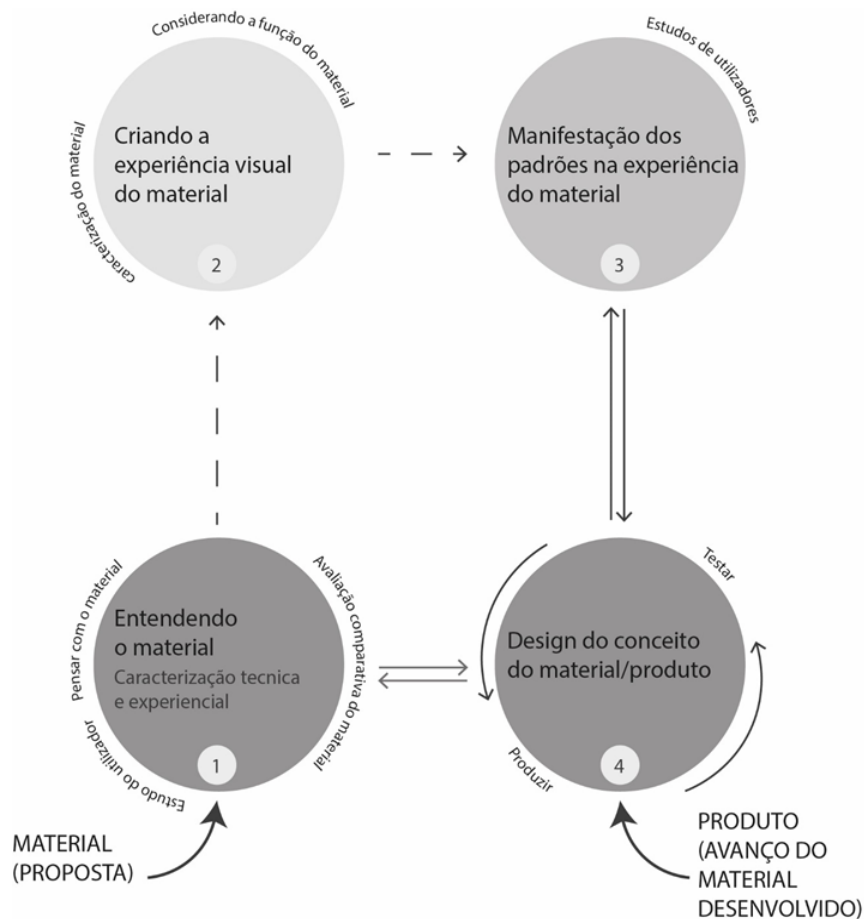


Figura 46 – Etapas do método MDD, adaptação de Karana et al. (2015).

3.7 Plano de investigação

O desenvolvimento do presente plano de investigação busca alcançar misturas sustentáveis à base de terra, que apresentem uma maior durabilidade. Assim, será estudado a incorporação de materiais com baixas emissões de CO₂, resíduos ou subprodutos, como: a cal hidráulica, o pó de mármore, a areia, o óleo de cozinha utilizado, a fibra de coco, a polpa de cacto e a sílica. O estudo encontra-se estruturado nas seguintes etapas:

Etapa 01 – Nesta fase, busca-se a recolha e organização dos materiais que apresentam potenciais para serem utilizados no desenvolvimento de uma argamassa à base de terra. Além de se confeccionar diversas amostras e ensaios manuais de capacidade de extrusão, construção, teste de estabilidade do cilindro, teste de fissuração por retração e estudo estético, de modo a atingir a consistência ideal para uma composição destinada à fabricação aditiva.

Etapa 02 – Na segunda etapa, realiza-se o processo de calibração da impressora 3D com base nas misturas produzidas na “Etapa 1”, de modo a verificar a compatibilidade da argamassa com a Delta WASP 40100.

Etapa 03 – Nesta fase, testam-se as composições que apresentaram melhor desempenho na etapa anterior. Verificando o potencial de aplicabilidade das amostras para um contexto de uso no setor da construção civil. Assim, é efetuado o estudo das amostras através dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) e de absorção de água.

Etapa 04 – Na última etapa é produzido um produto final através da impressão 3D, com o propósito de validar a usabilidade da mistura.

3.7.1 Etapa 1

Em conformidade com o plano de investigação, a Etapa 01 é produzida através da produção das misturas, ensaios iniciais, recolha e organização dos materiais, sendo estes os seguintes:

Materiais:

- **Terra crua:** Apresenta-se como material base para o desenvolvimento da composição (figura 47). A terra utilizada foi obtida através de uma operação de terraplanagem na região de Melides e é a mesma aplicada na investigação realizada por M. Buson et al. (2024). Esta amostra apresenta cerca de 39% de areia, 3% de cascalho fino, 29% de argila e 29% de silte na sua composição (M. Buson et al., 2024). Além disso, o solo contém um peso volúmico das partículas de 26,6(kN/m³), limite líquido de 34%, limite plástico de 18% e índice de plasticidade de 16% (M. Buson et al., 2024);



Figura 47 – Terra crua utilizada.



Figura 48 – Pó de mármore utilizado.



Figura 49 – Cal hidráulica utilizada.

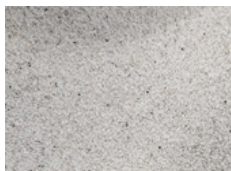


Figura 50 – Areia utilizada.

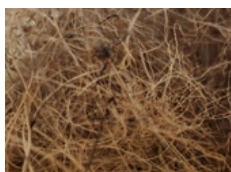


Figura 51 – Fibra de coco utilizada.



Figura 52 – Óleo de cozinha aplicado.



Figura 53 – Sílica utilizada.

- **Água:** Fornece trabalhabilidade à composição, além de se apresentar como um ativador, permitindo que os materiais se misturem e se tornem em uma mistura homogênea;
- **Pó de mármore:** Fomenta a economia circular ao se inserir de volta na cadeia de consumo. Além disso, este material pode ajudar a obter uma composição mais coesa e rígida ao substituir parcialmente o uso da cal (Faleschini et al., 2023) (figura 48);
- **Cal hidráulica:** Segundo o estudo realizado por Alqenae & Memari (2022) a cal pode aumentar a resistência a compressão da mistura à medida que a sua percentagem aumenta (figura 49);
- **Areia:** A inserção da areia pode acertar a distribuição das partículas, de forma a tornar o solo mais adequado para a sua impressão (Faleschini et al., 2023) (figura 50);
- **Fibra de coco:** O uso de fibra curta ajuda a diminuir a retração do material (Faleschini et al., 2023). Por isso, estas fibras foram cortadas manualmente em um tamanho médio de 5mm, de forma a facilitar a sua extrusão e melhorar a composição (figura 51);
- **Óleo de cozinha utilizado:** O uso deste material pode melhorar a durabilidade da composição à base de terra ao entrar em contato com a água (Rute et al., 2014). Assim como o pó de mármore, o óleo utilizado é um resíduo em abundância, desta forma o seu uso favorece a economia circular. O óleo utilizado nesta investigação foi o doméstico, sem especificações da sua origem vegetal. Para sua utilização, foi necessário realizar uma filtragem inicial para a retirada de possíveis matérias sólidas (figura 52);
- **Sílica:** A sílica tem um papel de melhorar a coesão, a resistência mecânica e a impermeabilização das misturas de concreto (Kazemian et al., 2017). Com base neste fator, o uso da Sika Fume S-92 D foi prevista para testar o aperfeiçoamento da composição à base de terra, direcionado a sua repelência à água (figura 53);
- **Polpa de cacto ficus da índia:** Segundo Rute et al. (2014), a figueira-da-índia é um biopolímero utilizado nas antigas construções em terra, na região do México e dos povos pré-colombianos, como impermeabilizante e para proteger a “face à chuva”. Além disso, Beas (1991) apresenta um estudo de caso também na América Latina, onde identifica o uso deste cacto com a finalidade de deixar uma parede de adobe mais resistente à água. Este estudo utilizou uma proporção de mistura de 350g da polpa do cacto submerso em 0,5l de água por um período mínimo de 24h (Beas,

1991). Seguindo esta base, inicialmente foi retirada a polpa do cacto e pesada, para assim realizar uma proporção com os valores dispostos por Beas e produzir um composto (cacto diluído em água) para uso após um mínimo de 24h. Assim o uso deste material foi realizado através da substituição parcial da quantidade de água da composição (figura 54);



Figura 54 – Conjunto de imagens do processo de obtenção da polpa de cacto.

Equipamentos:

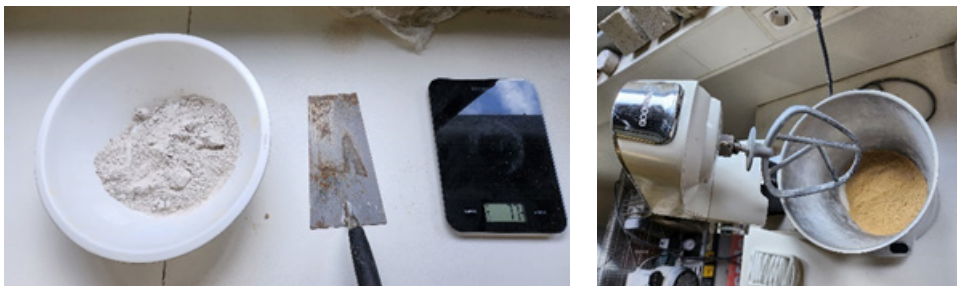


Figura 55 – Equipamentos usados no processo de obtenção da argamassa.

- **Misturadora:** Utilizada para misturar os materiais da argamassa, de forma a torná-los uma composição homogênea (figura 55). A sua aplicação no processo de obtenção da mistura se procedeu através da inserção dos componentes granulares junto aos líquidos em seu recipiente, com posterior ativação na velocidade intermediária por 10 minutos;
- **Balança:** A balança utilizada teve a função de medir com precisão a quantidade de cada material, de maneira a ajudar a se obter a proporção adequada para a realização das misturas, em unidade de massa;
- **Saco de confeiteiro:** Utilizado para simular o processo de impressão 3D manualmente, sua utilização foi garantida através da inclusão da argamassa no saco de confeiteiro e a testagem manual da extrusão;
- **Fita métrica:** Apresentou um papel fundamental para a medição das amostras, de forma a ser um equipamento de validação para os ensaios que serão apresentados posteriormente;
- **Recipientes:** Serviram de base para a medição dos materiais na balança, antes de serem inseridos na misturadora;

- **Termómetro:** Utilizado para monitorar a temperatura do ambiente e a humidade relativa do ar do laboratório, de forma a relacionar possíveis variações nas misturas devido a estas alterações climáticas;
- **Cronómetro:** Foi utilizado para medir o tempo em que a mistura estava batendo e o tempo em que a mistura ainda apresentava trabalhabilidade;
- **Máquina fotográfica:** Auxiliou no processo de documentação dos ensaios e de produção das misturas, de modo a registar os resultados para posterior análise dos mesmos;
- **Molde cilíndrico:** Aplicado durante o teste de estabilidade do cilindro, utilizado para moldar os corpos de prova;
- **Colher e espátula:** Foram utensílios essenciais para a realização das misturas, além de ajudar na manipulação das composições;

Argamassa de referência

Posterior à organização dos materiais, se procedeu a criação das misturas iniciais, com o objetivo de encontrar uma composição referência para um futuro aprimoramento. Esta seleção teve como propósito verificar o potencial de extrusão da terra crua manualmente, com projeção para a sua aplicação na Delta WASP 40100.

As primeiras misturas desenvolvidas se apresentam em três grupos de experiências, estas foram feitas à base de terra crua, água, cal, pó de mármore e areia, de modo a se fundamentarem nas misturas desenvolvidas por: Gomaa et al., (2019), Alhumayani et al., (2020), Alqenaee & Memari (2022), Ferretti et al., (2022), Faleschini et al., (2023) e Buson et al. (2024). Assim, estas composições foram testadas segundo os seguintes ensaios, para sua posterior seleção:

1 Capacidade de extrusão: Segundo Ribeiro (2023), este ensaio tem como objetivo compreender o potencial de fluidez e trabalhabilidade do material a ser extrudido. Deste modo, o teste é realizado através da inserção do material em um saco de confeiteiro, com extrusão manual e posterior análise do filamento resultante do processo (figura 56).



Figura 56 – Composições de imagens da autora retratando o teste de capacidade de extrusão.

2 Capacidade de construção: Conforme o estudo realizado por Malaleb et al. (2015), a capacidade de construção de 5 camadas sobrepostas no contexto de impressão 3D indica um potencial de fabricação da argamassa analisada. Assim, este teste será realizado com a extrusão manual através de um saco de confeiteiro, de modo a perceber a aptidão da composição em alcançar 5 camadas (figura 57). Esse teste pode sofrer variações devido a produção manual, mas serve também como uma base para escolher a composição com melhor aderência entre as camadas.



Figura 57 – Ensaio de capacidade de construção.

3 Teste de estabilidade do cilindro: Segundo G. Silva et al. (2022), este teste tem como objetivo compreender a estabilidade da mistura terrosa ao sofrer compressão por carga. De forma a se assemelhar ao processo de impressão de camadas, no qual o primeiro filamento sofre deformações ao receber os filamentos subsequentes. Assim, este ensaio foi desenvolvido através de amostras moldadas, com posterior sobreposição de duas cargas, a primeira com 176g (figura 58) e a segunda 114g, valores proporcionais ao teste realizado pelo G. Silva et al. (2022). Além disso, com o objetivo de testar ao máximo a composição, também foi realizado o ensaio com outras duas cargas, 456g e 433g. Resultando em uma deformação média das composições (medida com o suporte da fita métrica), que deverá ser levada em consideração para se escolher a melhor mistura para a fabricação aditiva.



Figura 58 – Composições de imagens retratando o teste de estabilidade do cilindro.

4 Teste de fissuração por retração: Segundo G. Silva et al. (2022), este teste é fundamental para o desenvolvimento de argamassas terrosas, visto que analisa o potencial de cura do material. Assim, este ensaio será realizado com a extrusão de um filamento de 100mm de comprimento, de forma manual com um saco de confeiteiro. Posterior a sua obtenção, é realizada uma análise de surgimento de fissuração maior que 1mm e um estudo da variação do comprimento em 7, 14 e 28 dias, de modo a compreender a taxa de retração da mistura.

5 Estudo estético: Este ensaio deve ser realizado com base no “Ensaio cromático” desenvolvido por Ribeiro (2023). Desta forma, terá como objetivo principal analisar visualmente as variações de cores das amostras e compreender as variações de texturas adquiridas. Assim, este estudo é realizado com a inserção das misturas em moldes de silicone, com posterior análise após a cura de 28 dias ou mais.



Figura 59 – Amostras desenvolvidas na Etapa 1.



Figura 60 – Amostras desenvolvidas na Etapa 1.

Grupo 01

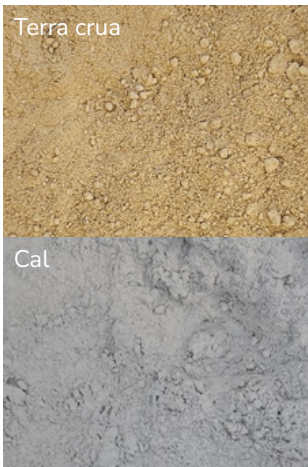


Figura 61 – Constituintes utilizados no Grupo 01.

Nesta busca pela composição de referência, inicialmente testou-se uma mistura baseada no levantamento do segundo capítulo, contendo 100% de terra crua e 25% de água em massa, TA1.0 (tabela 08). Com a produção desta primeira mistura, observou-se que a composição apresentava pouca trabalhabilidade, devido à viscosidade, para sua aplicação na impressora DELTA WASP 40100, de forma a necessitar de mais água ou da inserção de outros materiais que ajudem a sua extrusão.

Assim, seguindo os critérios de materiais necessários para se obter uma mistura de referência com maior resistência mecânica e melhor trabalhabilidade, foi avaliada a inserção da cal e da quantidade de água necessária para o melhoramento da composição. De modo que as composições de TAC2.0 à TAC2.4, apresentaram a substituição de 6%, 10%, 13% e 20% de terra crua pela cal (figura 61) e o aumento da quantidade de água. Assim, através destas misturas foram realizados os ensaios iniciais e identificado que:

Tabela 08 – Misturas desenvolvidas do Grupo 01.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)
TA 1.0	500	125	-	-	-
TAC 2.0	469	125	-	31	-
TAC 2.1	467	167	-	33	-
TAC 2.2	447	167	-	53	-
TAC 2.3	433	167	-	67	-
TAC 2.4	400	167	-	100	-

1. **Capacidade de extrusão:** Houve dificuldade de realizar a extrusão nas amostras que apresentavam menos quantidade de água. Entretanto, com o acréscimo de água e de cal, foi observado uma maior trabalhabilidade, mas ainda não o suficiente para a extrusão da composição pela impressora, considerando a alta força manual exercida.



2. **Capacidade de construção:** Por conta da mistura se apresentar mais seca com o acréscimo da cal, a composição TAC2.0 não conseguiu ser extrudida em camadas (ver anexo). As demais misturas do Grupo 01, alcançaram de 3 a 6 camadas sobrepostas, devido neste caso a sua estabilidade.



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** Neste teste foi possível concluir que por conta da pouca fluidez deste grupo de composições a estrutura manteve-se, de modo a apresentar um abaixamento máximo de 20mm de uma medida inicial de 50mm. Para além disso, a mistura com melhor resposta aos testes anteriores (TAC2.4) teve um abaixamento de 9mm, mantendo sua forma mesmo com sobreposição total das cargas.

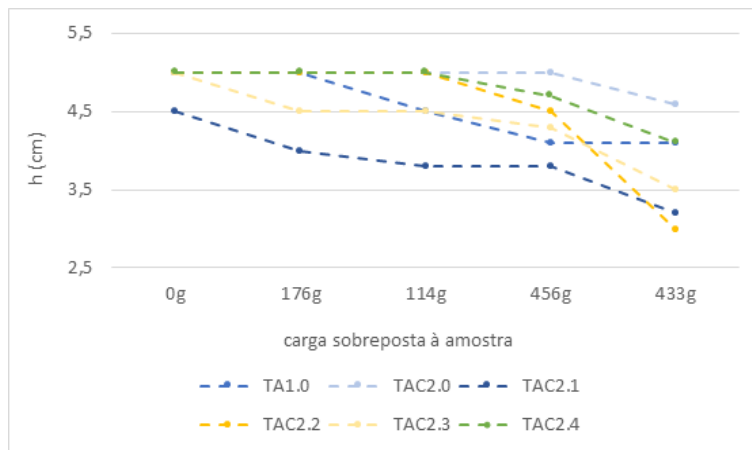


Gráfico 02 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 01, imediato a produção da composição.

4. **Teste de fissuração por retração:** Com relação a fissuração, o filamento TAC2.0 apresentou quebra, as demais misturas retraíram em um máximo de 5mm após passado os 28 dias.



5. **Estudo estético:** As aparências destas composições se mantiveram semelhantes, com mudança na intensidade do tom terroso à medida que a percentagem de terra crua mudava.



Por meio destes testes realizados, foi possível compreender que quanto maior a quantidade de cal, maior é a necessidade de inserção de água na mistura, uma vez que as consistências das misturas com a inclusão deste material se apresentavam menos trabalháveis. Além disso, às misturas TAC2.0, TAC2.3 e TAC2.4 conseguiram suportar mais carga no teste de estabilidade do cilindro. Assim, a mistura TAC2.4 conseguiu obter a melhor resolução nos testes e se tornou uma referência para ser seguida nos próximos experimentos com o Grupo 02.

Grupo 02

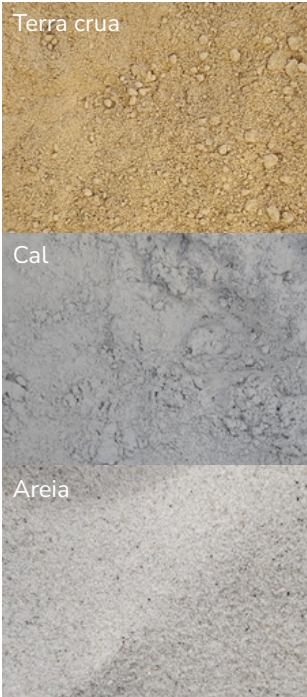


Figura 62 – Constituintes utilizados no Grupo 02.

Posteriormente, realizou-se a inserção da areia na composição, visto que este material aumenta a facilidade de extrusão. Para a inclusão deste material na mistura foram feitas substituições da terra crua pela areia, de forma a apresentarem as variações aproximadas com 6%, 13%, 20% e 26% de areia (figura 62). Assim, com estas misturas definidas (tabela 09) foram realizados os seguintes ensaios iniciais:

Tabela 09 – Misturas desenvolvidas do Grupo 02.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)
TACAR 3.0	367	167	-	100	33
TACAR 3.1	333	167	-	100	67
TACAR 3.2	300	167	-	100	100
TACAR 3.3	267	167	-	100	133

1. **Capacidade de extrusão:** Observou-se um aumento na trabalhabilidade do material e da sua fluidez, tornando possível extrudir todas as composições deste Grupo 02.



2. **Capacidade de construção:** Quanto maior a quantidade de areia na composição, menos camadas é possível sobrepor. De modo que, na primeira composição se alcançou 5 camadas, na segunda 4 camadas, na terceira 3 camadas e na quarta mistura 2,5 camadas. Assim, observa-se que quanto maior areia, menor pode ser a coesão.



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** Dentre estas misturas testadas, foi possível concluir que a partir da TACAR3.1 existe um aumento do abaixamento das amostras, de modo que ao saírem dos moldes já era identificado um abatimento da composição. Além disso, ao se analisar as misturas percebe-se que a TACAR3.1 adquiriu mais fluidez e manteve a sua estabilidade, visto que apresentou um abaixamento de 13mm, um valor menor do que as demais amostras subsequentes.

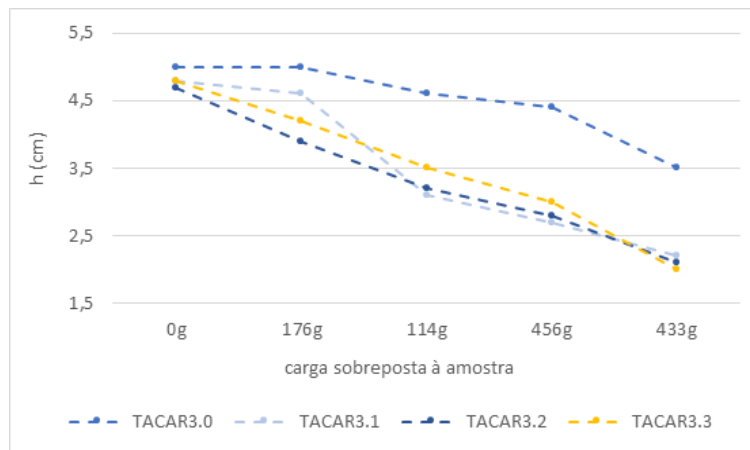
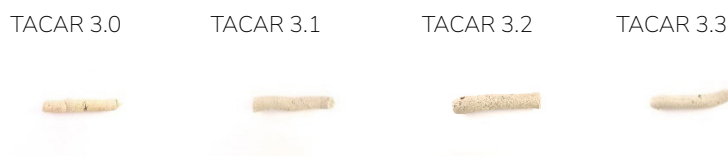


Gráfico 03 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 02.

4. **Teste de fissuração por retração:** Nenhuma das amostras apresentaram fissuração. Além disso, os filamentos retraíram em um máximo de 5mm após passado os 28 dias, e na mistura com 13% não houve diminuição do comprimento do filamento.



5. **Estudo estético:** As aparências destas composições se mantiveram semelhantes (ver anexo).



Ao analisar os testes realizados, percebe-se que a amostra TACAR3.1 apresentou o melhor retorno para atender as necessidades de uma I3D, visto que ao incluir 13% de areia a mistura já apresenta um aumento significativo na trabalhabilidade. Além disso, esta composição se manteve íntegra no teste de fissuração após os 28 dias de cura, de modo que é previsto a aplicação desta quantidade de areia nas subsequentes misturas. Entretanto, é importante observar que houve uma diminuição na capacidade de construção.

Grupo 03



Figura 63– Constituintes utilizados no Grupo 03.

Em seguida, uma vez que o pó de mármore é um resíduo presente em grande quantidade no mundo e que apresenta o aumento da resistência mecânica em substituição parcial da cal hidráulica, foi sugerida a sua inserção na composição referência. Assim, inicialmente foi realizada a substituição total dos 20% da cal hidráulica presente na mistura TACAR3.1 pelo pó de mármore, de modo a gerar a composição TAPMAR4.0 (tabela 10), nesta experiência foi observado que a mistura ficou pouco consistente. Desta forma optou-se pela substituição parcial da cal hidráulica pelo pó de mármore, com a diminuição da água na mistura TAPMCAR4.1, entretanto como resultado foi observado que a mistura se tornou mais seca e sem a possibilidade de ser extrudida.

Entre as composições TAPMCAR4.2 e TAPMCAR4.3 foram feitas substituições da cal hidráulica pelo pó de mármore, mantendo a quantidade de água em 33%. Essa alteração resultou na composição 4.3, que apresenta 13% de pó de mármore, 13% da cal e 13% da areia (figura 63).

Posteriormente, com o intuito de aumentar a trabalhabilidade da mistura, a composição TAPMCAR 4.4 apresentou um aumento na quantidade de areia, entretanto não se atingiu a expectativa de tornar a mistura mais trabalhável. Posteriormente, na mistura TAPMCAR 4.5 foi aplicada a variação da TAPMCAR 4.3, de modo a apresentar um aumento na quantidade de água, adquirindo a consistência ideal para a impressão. Ademais, na mistura TAPMCAR 4.6 buscou-se reduzir a quantidade de água inserida na mistura, entretanto não se obteve um bom resultado manual. Assim, para esta verificação, foram desenvolvidos os ensaios iniciais:

Tabela 10 – Misturas desenvolvidas do Grupo 03.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)
TAPMAR 4.0	333	167	100	-	67
TAPMCAR 4.1	338	149	32	65	65
TAPMCAR 4.2	333	167	33	67	67
TAPMCAR 4.3	300	167	67	67	67
TAPMCAR 4.4	287	167	67	67	80
TAPMCAR 4.5	300	193	67	67	67
TAPMCAR 4.6	300	180	67	67	67

1. **Capacidade de extrusão:** As misturas que apresentavam substituição parcial da cal hidráulica e maior quantidade de água obtiveram uma melhor extrusão manual. Além disso, através deste teste foi identificado que quanto maior a quantidade de água inserida, maior é a fluidez da composição.



2. **Capacidade de construção:** Quanto maior era a quantidade de água, menor era a capacidade de construção manual.



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** Ao inserir mais água e manter a menor quantidade de pó de mármore na mistura, foi observado que as composições não apresentavam uma boa capacidade de estabilização. De forma que a mistura 4.2 apresentou uma diminuição total de 22mm em relação à medida inicial após a moldagem de 50mm.

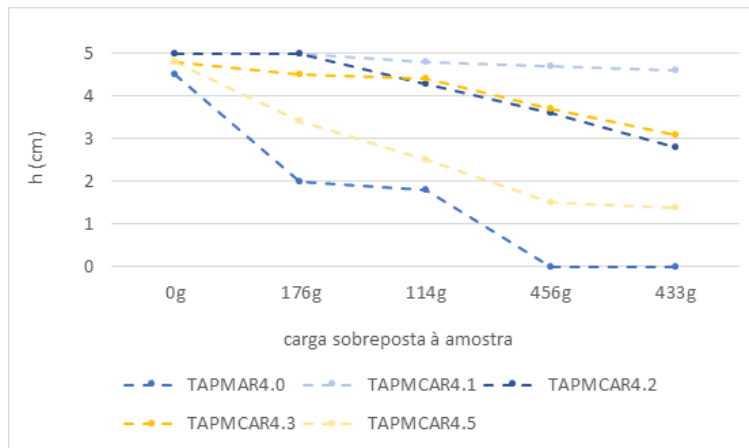


Gráfico 04 – Teste de estabilidade das amostras do Grupo 03.

4. **Teste de fissuração por retração:** Com relação a fissuração, apenas uma das misturas apresentou. Além disso, as composições retraíram em um máximo de 10mm após passado os 28 dias. Esse ensaio apresentou uma maior retração em comparação com as demais misturas até o momento, o que pode ser resultante da aplicação do pó de mármore.



5. **Estudo estético:** Em relação a sua aparência, as misturas apresentaram uma semelhança entre si, sem adquirir uma textura distinta umas das outras.



Desta forma, as misturas 4.2, 4.3 e 4.5 se apresentam aptas para serem testadas na Etapa 2, uma vez que estas composições obtiveram uma boa extrusão manual, trabalhabilidade e a inserção de compostos que ajudam a resistência mecânica de misturas à base de terra.

Síntese

A investigação dos materiais e a análise das suas propriedades definem a produção da composição de referência, que fornece uma base para um posterior aprimoramento desta, com o aumento da sua repelência à água. Desta forma, a análise realizada no primeiro momento foi necessária para se adquirir uma composição com materiais que aumentem a resistência mecânica do material, além de serem de possível extrusão manual.

Assim, através da investigação realizada é evidente que as composições 4.2, 4.3 e 4.5 devam ser testadas diretamente na impressora DELTA WASP 40100, uma vez que as composições podem mudar de comportamento em relação à impressora selecionada para a sua aplicação. Ressaltando que dentre as misturas testadas a TAPMCAR 4.5 adquiriu a melhor resposta a trabalhabilidade e fluidez.

Tabela 11 – Síntese das Misturas desenvolvidas para gerar a referência.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)
TA 1.0	500	125	-	-	-
TAC 2.0	469	125	-	31	-
TAC 2.1	467	167	-	33	-
TAC 2.2	447	167	-	53	-
TAC 2.3	433	167	-	67	-
TAC 2.4	400	167	-	100	-
TACAR 3.0	367	167	-	100	33
TACAR 3.1	333	167	-	100	67
TACAR 3.2	300	167	-	100	100
TACAR 3.3	267	167	-	100	133
TAPMAR 4.0	333	167	100	-	67
TAPMCAR 4.1	338	149	32	65	65
TAPMCAR 4.2	333	167	33	67	67
TAPMCAR 4.3	300	167	67	67	67
TAPMCAR 4.4	287	167	67	67	80
TAPMCAR 4.5	300	193	67	67	67
TAPMCAR 4.6	300	180	67	67	67

Argamassa aprimorada

Como visto no Estado da Arte, as argamassas à base de terra apresentam uma alta retração durante a cura e uma considerável absorção de água, de modo a ser extremamente pertinente realizar aprimoramentos na mistura que se pretende aplicar na I3D.

Desta forma, visto que a mistura 4.5 apresentou o melhor potencial de fluidez e trabalhabilidade, tornou-se apropriado que esta seja a composição referência para os seguintes aprimoramentos. Estes melhoramentos se guiaram pelo estudo realizado no segundo capítulo, que apresentou alguns materiais que indicam a melhora de composições à base de terra, sendo estes: fibra de coco, óleo de cozinha, polpa de cacto e sílica.

Grupo 01



Figura 64 – Constituintes utilizados no Grupo 01 de misturas aprimoradas.

Assim, em busca do aprimoramento da composição foram feitas investigações iniciais em torno da aplicação da fibra de coco em misturas à base de terra, visto que este material pode evitar a fissuração da composição. Com base nas composições investigadas anteriormente em “Argamassa para impressão 3D com terra crua”, identificou-se que as misturas com inserção de fibras apresentavam uma proporção de 1% a 2% da sua massa total (figura 64). Desta forma, se referenciando por este estudo, foi inserido na primeira mistura deste grupo um valor de 0,8% de fibra de coco, cortada manualmente em torno de 5mm. Entretanto, ao se testar esta proporção foi observado que as fibras não se homogeneizaram com a composição, e se juntavam na hélice da batedeira, de forma que poderia entupir o bico de extrusão da impressora 3D. Assim, foi desenvolvida a segunda composição com fibra (tabela 12), TAPMCARF5.1, a qual apresentava 0,2% da massa da composição e teve uma melhor resposta à sua inserção. O método de mistura dos materiais se procedeu inicialmente com a mistura da terra, areia e pó de mármore, em seguida inserção da cal hidráulica e da fibra, para posterior inserção da água gradativamente. Assim, de modo a validar estas misturas foram realizados os testes iniciais:

Tabela 12 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 01.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARF 5.0	298	192	66	66	66	4	-	-	-
TAPMCARF 5.1	299	193	67	67	66	1	-	-	-

1. **Capacidade de extrusão:** As duas misturas apresentam uma possível extrusão manual, entretanto a composição 5.0 necessita de mais força manual para que toda a mistura saia do saco de confeiteiro, por conta do excesso de fibra.

TAPMCARF 5.0 TAPMCARF 5.1



2. **Capacidade de construção:** As duas misturas atingiram a capacidade de construção de 5 camadas.

TAPMCARF 5.0 TAPMCARF 5.1



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** A primeira mistura conseguiu se manter com menos deformação após a carga sobreposta à amostra.

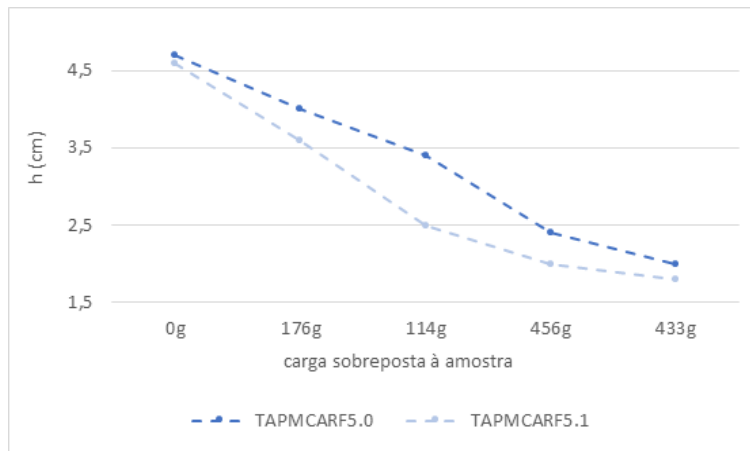


Gráfico 05 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 01.

4. **Teste de fissuração por retração:** Após os 28 dias de cura dos filamentos, foi possível identificar que a mistura 5.1 não apresentou retração visível. A primeira composição teve uma retração de 5mm da sua dimensão inicial, podendo ter uma relação com a falta de homogeneidade das fibras na mistura.



5. **Estudo estético:** Em relação a sua aparência, as misturas apresentaram uma semelhança entre si. Entretanto, a textura era mais áspera em comparação às realizadas anteriormente.



Assim a composição TAPMCARF5.1 apresentou resultados pertinentes em relação a TAPMCARF5.0, visto que a obteve uma distribuição mais homogênea das fibras, tornando-se a mistura mais apta para ser usada como referência para retração.

Grupo 02



Figura 65 – Constituintes utilizados no Grupo 02 de misturas aprimoradas.

Posteriormente, visto o potencial presente na aplicação do óleo de cozinha em misturas à base de terra, foram desenvolvidas amostras para o seu estudo, mesmo apresentando diferentes elementos graxos por ser um resíduo. A composição TAPMCARO 6.0 apresentou a substituição de 15% do valor total da massa da água, que está presente na mistura de referência TAPMCAR 4.5, pelo óleo de cozinha (figura 65). Esta troca parcial de componente resultou em uma mistura mais consistente, com menos fluidez, e sem apresentar separação da água e do óleo, se emulsionando.

Assim, testou-se uma composição com 5% de substituição do valor da água, TAPMCARO 6.1, entretanto a mistura se manteve com pouca fluidez. De forma que, quanto mais se misturava mais o óleo tornava a composição densa. Posterior a esta observação, foi então desenvolvida uma mistura mantendo a proporção inicial de água e foi acrescido mais 5% de óleo, formando a mistura 6.2, que dentre as demais é a que melhor se comportou em termos de trabalhabilidade. Já a mistura 6.3, foi desenvolvida com a substituição de 30% de água por óleo, de forma a verificar que este material torna a composição mais firme e de difícil extrusão.

Em seguida, de modo a analisar a aplicação de fibras às misturas que apresentaram a melhor consistência, 6.1 e 6.2, criou-se a composição TAPMCARFO 6.5. Esta amostra apresentou a melhor extrusão manual, além de ter a inserção da fibra para auxiliar na retração e do óleo para a hidrofobia, de modo a se tornar a mistura mais adequada, entre as demais deste grupo, para aplicação em uma impressora 3D. Assim, a conclusão dos ensaios iniciais foram:

Tabela 13 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 02.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacato (g)	Sílica (g)
TAPMCARO 6.0	300	164	67	67	66	-	29	-	-
TAPMCARO 6.1	300	183	67	67	66	-	10	-	-
TAPMCARO 6.2	300	193	67	67	66	-	10	-	-
TAPMCARO 6.3	300	135	67	67	66	-	58	-	-
TAPMCARFO 6.4	299	183	67	67	66	1	10	-	-
TAPMCARFO 6.5	299	193	67	67	66	1	10	-	-

1. **Capacidade de extrusão:** As misturas com menor percentual de óleo apresentaram uma melhor capacidade de extrusão.

TAPMCARO 6.0 TAPMCARO 6.1 TAPMCARO 6.2 TAPMCARO 6.3 TAPMCARFO 6.4 TAPMCARFO 6.5



2. **Capacidade de construção:** Com exceção da mistura TAPMCAR-RO6.3 que não conseguiu realizar o teste, e da amostra TAPMCARO6.1, que alcançou 5 camadas de construção, as demais conseguiram alcançar uma capacidade de construção em torno de 4 camadas e em seguida colapsaram.



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** As misturas com menor percentual de óleo apresentaram uma diminuição da sua altura que não ultrapassou 29mm em relação a medida inicial de 50mm, sendo uma variação próxima da presente na argamassa de referência, TAPMCAR 4.5.

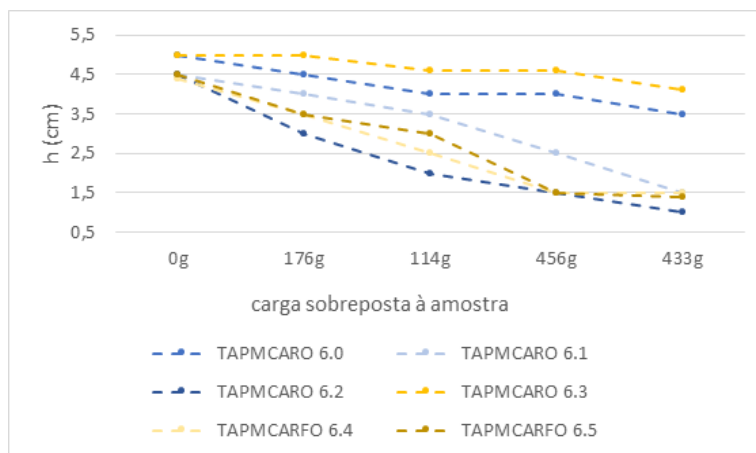
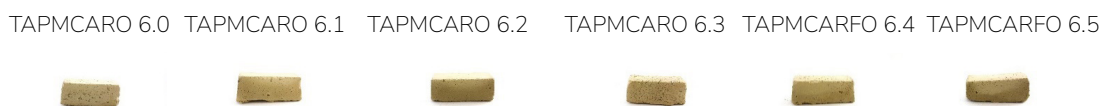


Gráfico 06 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 02.

4. **Teste de fissuração por retração:** Este grupo apresentou variações na medida do filamento em torno de 5mm e duas composições tiveram seus filamentos repartidos.



5. **Estudo estético:** Em relação a sua aparência, as misturas sem fibra mantiveram sua tonalidade semelhante e sem textura que sobressaísse. Já as composições com fibra se apresentaram com cores similares, e uma textura mais áspera em comparação com as demais. A mistura TAPMCARO 6.3 se destacou negativamente por apresentar óleo ao se tocar as amostras.



Grupo 03



As misturas com a inclusão da polpa de cacto foram desenvolvidas com o objetivo de avaliar a capacidade de repelência à água e o aumento da plasticidade ao incluir este material (figura 66). Assim, foram feitas as substituições da água em relação a mistura de polpa e água, apresentada anteriormente, em diferentes proporções: 5%, 15% e 30% (tabela 14). Os resultados indicaram que a consistência da argamassa melhorou significativamente proporcionalmente ao acréscimo do cacto, com base nos seguintes ensaios:

Tabela 14 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 03.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARCC 7.0	300	164	67	67	66	-	-	29	-
TAPMCARCC 7.1	300	135	67	67	66	-	-	58	-
TAPMCARCC 7.2	300	174	67	67	66	-	-	58	-
TAPMCARCC 7.3	300	183	67	67	66	-	-	10	-
TAPMCARFCC 7.4	299	135	67	67	66	1	-	58	-

1. **Capacidade de extrusão:** Todas as misturas apresentaram uma boa capacidade de extrusão. Entretanto, a composição que tinha 30% de polpa de cacto obteve uma maior trabalhabilidade em comparação com as demais.



2. **Capacidade de construção:** As misturas com cacto apresentaram variações na capacidade de construção, entre 3 e 1 camada, sendo que quanto maior a quantidade de cacto menor foi a capacidade.



Figura 66 – Constituintes utilizados no Grupo 03 de misturas aprimoradas.

3. **Teste de estabilidade do cilindro:** Observou-se que quanto maior a quantidade de cacto menor é a estabilidade da amostra ao receber cargas. De forma que ao receber a primeira carga a composição TAPMCARCC 7.2, com 30% de cacto, chegou a 0mm de altura resultante.

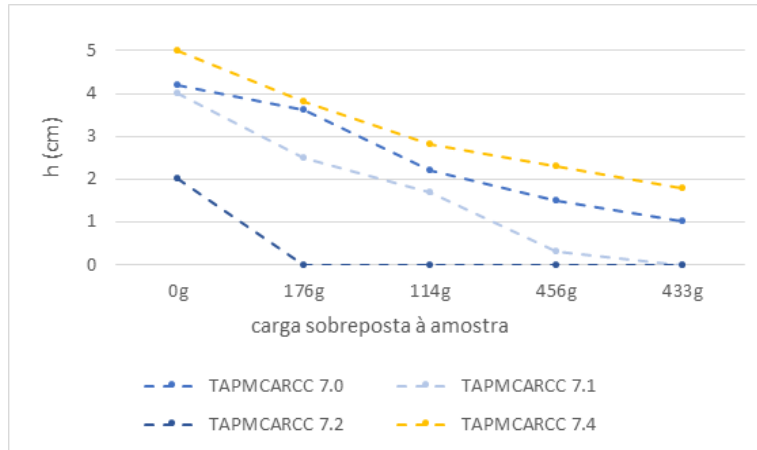


Gráfico 07 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 03.

4. **Teste de fissuração por retração:** A retração presente não ultrapassou 5mm.

TAPMCARCC 7.0 TAPMCARCC 7.1 TAPMCARCC 7.2 TAPMCARCC 7.3 TAPMCARFCC 7.4



5. **Estudo estético:** Em relação a sua aparência, se assemelhou ao Grupo 02 do aprimoramento, onde as misturas sem fibra mantiveram sua tonalidade semelhante e sem textura. E a composição com fibra se difere por apresentar uma textura mais áspera.

TAPMCARCC 7.0 TAPMCARCC 7.1 TAPMCARCC 7.2 TAPMCARCC 7.3 TAPMCARFCC 7.4



Assim, analisando os ensaios iniciais foi possível compreender que a mistura TAPMCARFCC 7.4 diminui o consumo de água em comparação à composição de referência, pois parte do composto é o cacto, e apresenta uma alta trabalhabilidade da composição, de modo a potencializar a sua aplicabilidade na I3D.

Grupo 04



As misturas à base de terra com a inserção da sílica foram desenvolvidas com o intuito de aumentar a repelência à água pela composição (figura 67). Assim, foram realizados dois grupos de misturas, de modo a testar a substituição da areia pela sílica, e do pó de mármore pela sílica, em uma proporção de 5%, 15% e 30% (tabela 15). Em seguida realizou-se os ensaios iniciais para verificar o potencial destas misturas:

Tabela 15 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 04.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARS 8.0	300	193	67	67	53	-	-	-	13
TAPMCARS 8.1	300	193	67	67	40	-	-	-	26
TAPMCARS 8.2	275	145	50	75	50	-	-	-	50
TAPMCARFS 8.3	299	193	40	67	67	1	-	-	26
TAPMCARS 8.4	300	193	53	67	67	-	-	-	13
TAPMCARS 8.5	300	193	40	67	67	-	-	-	26

1. **Capacidade de extrusão:** As misturas apresentaram uma boa extrusão manual de imediato, entretanto o seu tempo de cura foi mais rápido do que as demais composições. Além disso, foi observado que a depender da quantidade de sílica inserida a mistura perde parte da trabalhabilidade.

TAPMCARS 8.0 TAPMCARS 8.1 TAPMCARS 8.2 TAPMCARFS 8.3 TAPMCARS 8.4 TAPMCARS 8.5



2. **Capacidade de construção:** Esta seleção de misturas conseguiu sobrepôr 3 camadas com a extrusão manual, entretanto algumas composições colapsaram.

TAPMCARS 8.0 TAPMCARS 8.1 TAPMCARS 8.2 TAPMCARFS 8.3 TAPMCARS 8.4 TAPMCARS 8.5



Figura 67 – Constituintes utilizados no Grupo 04 de misturas aprimoradas.

3. **Teste de estabilidade do cilindro:** Com a inserção dos dois pesos iniciais as misturas TAPMCARS8.0, TAPMCARS8.1 e TAPMCARS8.2 retraíram pouco, entretanto ao se testar com os demais pesos foi observado que quase todas as composições diminuíram até uma diferença de 10mm da altura anterior, com exceção das misturas TAPMCARS8.3, TAPMCARS8.4 e TAPMCARS8.5, que apresentaram uma menor variação em relação à medição anterior.

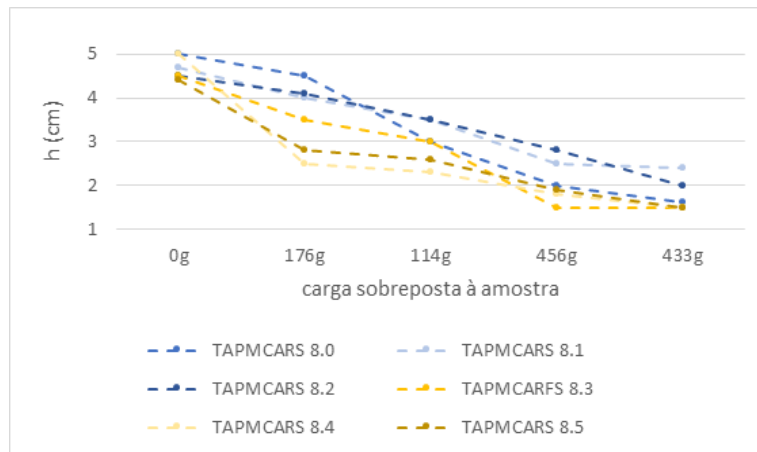


Gráfico 08 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 04.

4. **Teste de fissuração por retração:** Algumas das misturas se reparam, inviabilizando as suas medições. Para além disso, a mistura TAPMCARS 8.0 apresentou a maior retração, com 6mm.

TAPMCARS 8.0 TAPMCARS 8.1 TAPMCARS 8.2 TAPMCARS 8.3 TAPMCARS 8.4 TAPMCARS 8.5



5. **Estudo estético:** Em relação à aparência, as composições com sílica apresentaram mudança na sua tonalidade, de modo que quanto mais sílica a composição tinha, maior era a mudança para tons de cinza. Ademais, as suas texturas se mantiveram no padrão dos demais grupos, se diferenciando apenas nas misturas com fibra.

TAPMCARS 8.0 TAPMCARS 8.1 TAPMCARS 8.2 TAPMCARS 8.3 TAPMCARS 8.4 TAPMCARS 8.5



Por meio da análise destes testes, concluiu-se que a sílica deixou as misturas mais secas e com menos trabalhabilidade. Assim, para validar a viabilidade de aplicação deste material na I3D, tornou-se importante testar uma das misturas na impressora DELTA WASP 40100. Neste caso, a composição com 15% de sílica e menor quantidade de pó de mármore foi a escolhida, visto que a sílica diminui a trabalhabilidade da mistura, e o pó de mármore também apresentou esta reação nestes ensaios anteriores.

Grupo 05

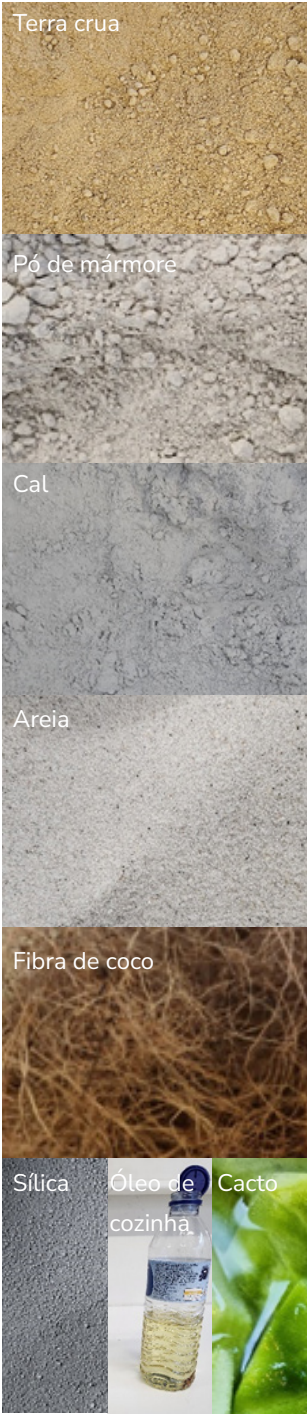


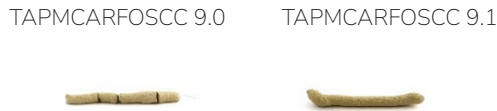
Figura 68 – Constituintes utilizados no Grupo 05 de misturas aprimoradas.

Este grupo de misturas foi desenvolvido com o objetivo de compreender o potencial de uma composição com todos os materiais de aprimoramento (figura 68), de modo a tentar aumentar a repelência à água da argamassa desenvolvida. Assim, estas misturas apresentam uma proporção dos materiais selecionados anteriormente, com base nas misturas: TAPMCARFCC 7.4, TAPMCARFS 8.3, TAPMCARFO 6.4 e TAPMCARFO 6.5. Resultando na mistura TAPMCARFOSCC 9.0, que não considerou o valor do óleo como parte do total de líquido de referência, e a TAPMCARFOSCC 9.1, que considerou o valor do óleo no valor de referência do líquido (tabela 16). Assim para a validação destas misturas realizou-se os seguintes ensaios iniciais:

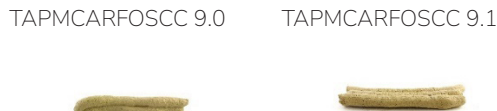
Tabela 16 – Misturas de aprimoramento desenvolvidas do Grupo 05.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARFOSCC 9.0	299	135	40	67	67	1	10	58	26
TAPMCARFOSCC 9.1	299	125	40	67	67	1	10	58	26

1. Capacidade de extrusão: As duas apresentaram uma boa extrusão manual.



2. Capacidade de construção: Esta seleção de misturas conseguiu sobrepôr 3 camadas com a extrusão manual.



3. **Teste de estabilidade do cilindro:** A primeira mistura apresentou falta de estabilidade de cilindro, de modo a resultar em uma altura final de 2mm. A segunda mistura, com menor quantidade de água, manteve em 20mm a sua altura resultante, evidenciando uma melhor estabilidade.

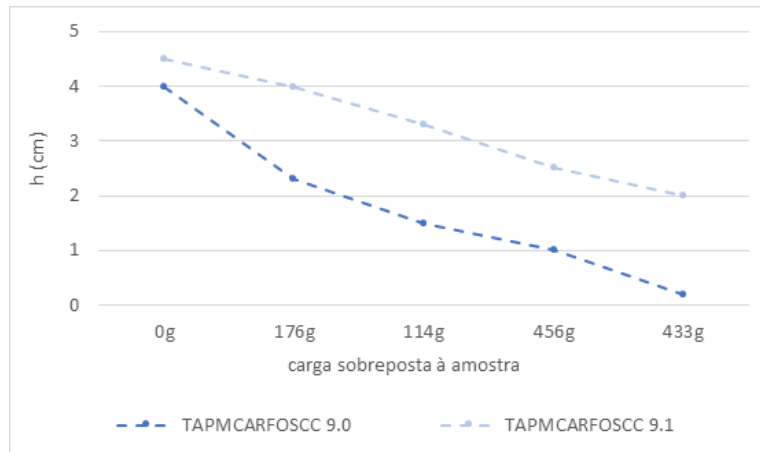


Gráfico 09 – Teste de estabilidade das amostras aprimoradas do Grupo 05.

4. **Teste de fissuração por retração:** A mistura TAPMCARFOSCC 9.1 não apresentou fissuras e não teve variações visíveis de dimensões após os 28 dias de cura.

TAPMCARFOSCC 9.0 TAPMCARFOSCC 9.1



5. **Estudo estético:** Em relação a sua aparência, as composições por apresentarem sílica tiveram uma tonalidade mais cinzenta e sua textura um pouco mais áspera por conta da fibra de coco.

TAPMCARFOSCC 9.0 TAPMCARFOSCC 9.1



Estas misturas se comportaram de forma distinta das misturas dos grupos anteriores, de modo que a composição TAPMCARFOSCC 9.1, mesmo com sílica e menos quantidade de água, apresentou uma boa trabalhabilidade e fluidez.

Síntese

Como síntese deste estudo, foi possível concluir que as composições (tabela 17) variam conforme as características e propriedades dos materiais inseridos. Dentre as misturas que apresentam uma boa capacidade de aplicação na impressão 3D, se destacam as seguintes: TAPMCARFOSCC 9.1, TAPMCARFCC 7.4, TAPMCARFS 8.3 e TAPMCARFO 6.5. Estas apresentam aspectos positivos e negativos, como por exemplo:

Aspecto positivo: De modo geral, as composições testadas não apresentam o uso de materiais com grandes impactos ambientais, obtiveram uma boa capacidade de extrusão manual e uma baixa retração.

Aspecto negativo: As composições se apresentam com baixa capacidade de construção e estabilização, o que pode influenciar na quantidade de camadas impressas durante o processo de fabricação aditiva.

Tabela 17 – Síntese das Misturas com aprimoramento.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	P o l p a do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARF 5.0	298	192	66	66	66	4	-	-	-
TAPMCARF 5.1	299	193	67	67	66	1	-	-	-
TAPMCARO 6.0	300	164	67	67	66	-	29	-	-
TAPMCARO 6.1	300	183	67	67	66	-	10	-	-
TAPMCARO 6.2	300	193	67	67	66	-	10	-	-
TAPMCARO 6.3	300	135	67	67	66	-	58	-	-
TAPMCARFO 6.4	299	193	67	67	66	1	10	-	-
TAPMCARFO 6.5	299	183	67	67	66	1	10	-	-
TAPMCARCC 7.0	300	164	67	67	66	-	-	29	-
TAPMCARCC 7.1	300	135	67	67	66	-	-	58	-
TAPMCARCC 7.2	300	174	67	67	66	-	-	58	-
TAPMCARCC 7.3	300	183	67	67	66	-	-	10	-
TAPMCARFCC 7.4	299	135	67	67	66	1	-	58	-
TAPMCARS 8.0	300	193	67	67	53	-	-	-	13
TAPMCARS 8.1	300	193	67	67	40	-	-	-	26
TAPMCARS 8.2	275	145	50	75	50	-	-	-	50
TAPMCARFS 8.3	299	193	40	67	67	1	-	-	26
TAPMCARS 8.4	300	193	53	67	67	-	-	-	13
TAPMCARS 8.5	300	193	40	67	67	-	-	-	26
TAPMCARFOSCC 9.0	299	135	40	67	67	1	10	58	26
TAPMCARFOSCC 9.1	299	125	40	67	67	1	10	58	26

3.7.2 Etapa 2

A segunda etapa consiste na realização da calibração da impressora 3D utilizada. Este processo foi realizado à medida que as misturas foram desenvolvidas, de modo a validar a aplicação das composições na fabricação aditiva. Nesta etapa foi utilizada uma geometria preliminar paramétrica desenvolvida pelo investigador João Teixeira do laboratório Digi – FEUP.

A impressora utilizada foi a DELTA WASP40100, que utiliza o método de extrusão de camadas de um material líquido (LDM), com os bicos de extrusão variando em 4mm, 6mm e 8mm, velocidade máxima de impressão de 150 mm/s e velocidade de deslocamento máxima de 150 mm/s (DELTA WASP, 2023).

Durante o desenvolvimento da argamassa de referência, foram selecionadas cinco composições que apresentavam melhores desempenho ao serem extrudidas manualmente. Estas misturas, TAPMCAR 4.2, TAPMCAR 4.3, TAPMCAR 4.4, TAPMCAR 4.5 e TAPMCAR 4.6 foram inseridas na impressora DELTA WASP40100, para que assim fosse possível compreender o nível de fluidez e trabalhabilidade necessário para a I3D. A mistura 4.2 não apresentou êxito na sua extrusão, uma vez que a mistura não passou pelo bico de extrusão de 8mm. Com a redução da terra crua e aumento do pó de mármore na mistura 4.3 (tabela 18), foi esperado que a composição se tornasse mais fluida e menos argilosa, entretanto o resultado não se alinhou com a expectativa, de forma que também não foi possível extrudar esta composição. O mesmo ocorreu na mistura 4.4, que optou pela substituição de terra crua por areia, com a finalidade de aumentar a trabalhabilidade da composição.

Assim, compreendendo que a inserção de mais água na composição poderia resultar em um aumento da fluidez e consequentemente na extrusão da matéria, a mistura 4.5 foi desenvolvida e apresentou êxito na I3D (figura 66). Posteriormente, com o intuito de diminuir o consumo de água testou-se a mistura 4.6, entretanto esta também não obteve a mesma capacidade de extrusão que a anterior adquiriu. Desta forma, seguido do teste de extrusão na I3D com a argamassa de referência 4.5, definiu-se a calibração da impressora, de modo a obter as seguintes informações:

- Bico de extrusão utilizado: 8mm
- Velocidade de impressão: 40m/s
- Espessura das camadas: 2,5mm
- Flow: 80%

A mistura 4.5, respondeu de forma positiva para o processo de impressão 3D, conseguindo alcançar 15 camadas impressas sem colapsar. Entretanto,

um dia após a produção da peça o modelo fissurou (figura 69), reforçando a necessidade de se efetuar um aprimoramento na mistura para diminuir a retração durante a cura da mesma.

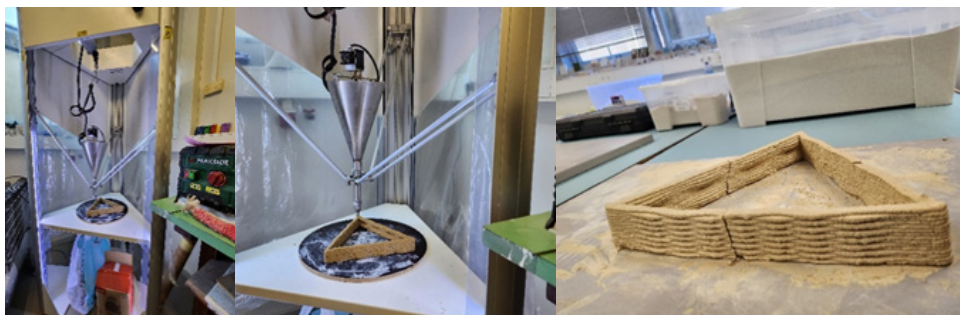


Figura 69 – Teste de impressão da composição TAPMCAR 4.5 na DELTA WASP 40100.

Tabela 18 – Composições de referências aplicadas na calibração da impressora.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)
TAPMCAR 4.2	333	167	33	67	67
TAPMCAR 4.3	300	167	67	67	67
TAPMCAR 4.4	287	167	67	67	80
TAPMCAR 4.5	300	193	67	67	67
TAPMCAR 4.6	300	180	67	67	67

Após a análise da aplicação da “Argamassa de referência” na impressora 3D, o teste de aplicação das “Argamassas aprimoradas” se procedeu com a inserção das seguintes amostras: TAPMCARF 5.1, TAPMCARFO 6.5, TAPMCARFCC 7.4, TAPMCARFS 8.3 e TAPMCARFOSCC 9.1.

O processo de aplicação da mistura TAPMCARF 5.1 na I3D apresentou inicialmente dificuldades (figura 70), visto que as fibras prendiam no parafuso da impressora 3D. No entanto, apesar desta problemática foi possível viabilizar a impressão da composição, uma vez que a mistura conseguiu alcançar mais de 5 camadas impressas.



Figura 70 – Teste de impressão da composição TAPMCARF 5.1 na DELTA WASP 40100.

A composição TAPMCARFO 6.5 apresentou uma boa capacidade de extrusão na DELTA WASP40100 (figura 71), alcançando a impressão de 12 camadas, sem colapsar e sem entupimento do bico da impressora. Entretanto, foram observados mais de três pontos de fissuração na geometria após 7 dias de cura (figura 72). Ademais, durante o processo de impressão foi necessário empurrar a composição no funil da impressora, de forma a auxiliar manualmente o processo de fabricação.



Figura 71 – Teste de impressão da composição TAPMCARFO 6.5 na DELTA WASP 40100.



Figura 72 – Fissuras apresentadas na impressão da composição TAPMCARFO 6.5.

A mistura TAPMCARFCC 7.4 demonstrou uma alta capacidade de I3D, de maneira que a sua extrusão se procedeu de forma rápida e sem intercorrências (figura 73). Além disso, esta composição conseguiu alcançar a impressão de 15 camadas, através de um processo de fabricação totalmente automatizado em comparação com a mistura anterior. Todavia, esta mistura também apontou algumas fissuras com espessuras menores do que as demais amostras, de forma a se destacar positivamente.



Figura 73 – Teste de impressão da composição TAPMCARFCC 7.4 na DELTA WASP 40100.

A produção da composição TAPMCARFS 8.3 resultou em uma mistura com difícil extrusão. A tentativa de impressão 3D com a impressora DELTA WASP40100 desta composição não se procedeu bem, isto por conta do sucessivo entupimento do bico extrusor, que poderá ter ocorrido devido a quantidade da sílica e da fibra (figura 74). Deste modo, esta composição apenas conseguiu atingir um total de 5 camadas sobrepostas e em menos de 24h já apresentou fissuras na geometria.



Figura 74 – Teste de impressão da composição TAPMCARFS 8.3 na DELTA WASP 40100.

Assim como a mistura anterior, a composição TAPMCARFOSCC 9.1 demonstrou pouca capacidade de extrusão, alcançando a construção de 5 camadas impressas (figura 75). Esta situação decorreu do entupimento do bico extrusor, de forma que foi necessário parar o processo de impressão

para realizar a limpeza desta duas vezes. Esta circunstância em uma impressão em grande escala pode prejudicar o cronograma definido, por isso esta composição não se adequa para aplicação no produto final.



Figura 75 – Teste de impressão da composição TAPMCARFOSCC 9.1 na DELTA WASP 40100.

Tabela 19 – Composições aprimoradas aplicadas na calibração da impressora.

Mistura	Terra crua (g)	Água (ml)	Pó de mármore (g)	Cal (g)	Areia (g)	Fibra (g)	Óleo de cozinha (g)	Polpa do cacto (g)	Sílica (g)
TAPMCARF 5.1	299	193	67	67	66	1	-	-	-
TAPMCARFO 6.5	299	183	67	67	66	1	10	-	-
TAPMCARFCC 7.4	299	135	67	67	66	1	-	58	-
TAPMCARFS 8.3	299	193	40	67	67	1	-	-	26
TAPMCARFOSCC 9.1	299	125	40	67	67	1	10	58	26

Assim, com a calibração da impressora 3D e identificação da mistura com maior potencial, foi possível concluir que a fluidez do material é determinante para a sua extrusão, e que o modelo da impressora utilizada pode interferir nos requisitos necessários para as misturas. Além disso, compreendeu-se que as composições à base de terra apresentam um tempo de trabalhabilidade alta, de modo que a mistura 4.5 apresentou esta trabalhabilidade durante 45min. Ademais, esta composição de referência determinou a consistência necessária para as subsequentes misturas, apresentando um filamento uniforme e com estabilidade na espessura do filamento. Para além disso, a alta trabalhabilidade e fluidez da mistura TAPMCARFCC7.4 fez com que esta composição aprimorada se comportasse como a mais indicada para uma futura aplicação em um produto impresso.

3.7.3 Etapa 3

Nesta etapa, são desenvolvidos os ensaios mecânicos de compressão e flexão, além do teste de absorção de água por imersão parcial, com a finalidade de se analisar o desempenho das misturas anteriormente selecionadas. Os ensaios de compressão e flexão são fundamentais para avaliar a capacidade do material em suportar cargas e esforços. O teste de absorção de água tem como objetivo analisar o comportamento das misturas em relação a sua absorção por meio capilar. Este ensaio se caracteriza de forma fundamental para composições à base de terra, visto que é um material vulnerável à humidade.

- **Ensaio mecânico - flexão:** Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência e rigidez das misturas à flexão, o mesmo foi realizado com base na norma EN 196-1:2016, considerando adaptações visto que a mistura é à base de terra. Além disso, a máquina utilizada para o ensaio deve seguir alguns parâmetros pré-estabelecidos pela norma, como a aplicação de cargas de até 10kN (Métodos de Ensaio de Cimentos: NP EN 196-1: 2006. Parte 1. Determinação Das Resistências Mecânicas / Instituto Português Da Qualidade, 2006). Com a utilização de uma velocidade condizente ao material aplicado às amostras, visto que podem resistir por menos tempo do que as composições convencionais.

Este ensaio foi realizado com as amostras TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1 em moldes prismáticos, com a finalidade de compreender o impacto das fibras em relação ao ganho de resistência mecânica, uma vez que este material diminui a retração e o fendilhamento da mistura.

Os provetes desenvolvidos apresentaram a dimensão de 160mmx40mmx40mm, seguindo os parâmetros expostos na norma EN 196-1:2016. Para a produção das amostras, inicialmente foram produzidas as composições 4.5 e 5.1, em seguida estas foram inseridas em moldes metálico com desmoldante (figura 76), após 7 dias de moldagem as amostras foram desmoldadas e secas em um ambiente com temperatura controlada, de modo que completasse 28 dias de cura. Posteriormente, os provetes foram levados ao laboratório para a realização dos ensaios.

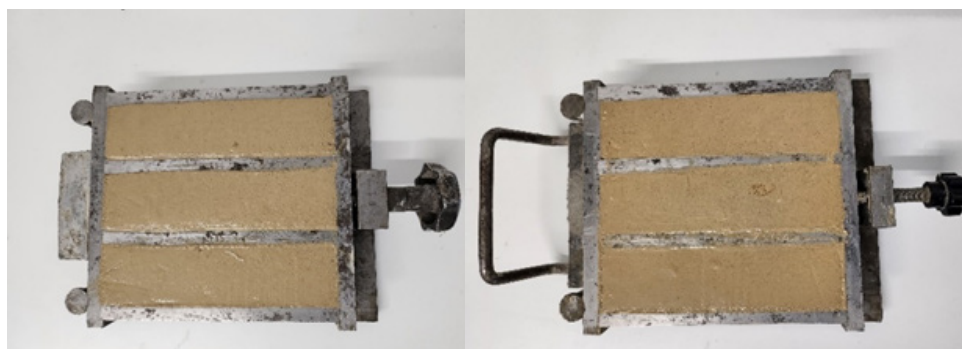


Figura 76 – Composição de imagens com os moldes dos provetes TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.

Os resultados levam em consideração três provetes para cada mistura (figura 77), de forma a validar e comprovar uma média da resistência. Assim, através deste ensaio foi possível observar que a composição sem fibra apresentou um melhor desempenho (figura 78) (tabela 20), visto que a mistura TAPMCAR 4.5 suportou uma resistência à força média maior (0,62MPa) em comparação à TAPMCARF 5.1 (0,52MPa). No entanto, é válido ressaltar que a orientação da fibra de forma desregulada pode ter ocasionado essa menor resistência na mistura 5.1. Além disso, a alta variação percentual presente na composição 4.5 indica que os resultados desta mistura são menos consistentes.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de flexão das composições TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.

Mistura-Provetes	Resistência à Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa) - média	Variação (%) - média
TAPMCAR 4.5 – P1	0,65	0,62	0,07	11,55
TAPMCAR 4.5 – P2	0,68			
TAPMCAR 4.5 – P3	0,64			
TAPMCARF 5.1 – P1	0,56	0,52	0,04	6,7
TAPMCARF 5.1 – P2	0,49			
TAPMCARF 5.1 – P3	0,52			

- **Ensaio mecânico - compressão:** O ensaio de compressão tem como finalidade compreender o potencial de resistência à compressão que as amostras anteriormente analisadas, 4.5 e 5.1, adquiriram. Este ensaio também levou em consideração a norma EN 196-1:2016 e foi realizado com as partes resultantes dos provetes do teste de flexão, deste modo obtiveram-se 6 provetes por composição (figura 79).

Este ensaio mecânico se demonstrou fundamental para a compreensão do potencial de aplicação das composições de terra na impressão 3D, uma vez que ao se realizar a sobreposição dos filamentos existe uma carga aplicada nas primeiras camadas.

Como resultado deste ensaio, pode-se observar uma pequena variação de 0,02MPa entre as amostras estudadas (tabela 21). A mistura TAPMCAR 4.5 (figura 80) (gráfico 10) apresentou um desvio padrão menor (0,04MPa) e uma variação percentual menor (2,6%) em comparação com a composição TAPMCARF 5.1 (gráfico 11), que apresentou um desvio padrão de 0,09MPa e variação de 5,1%.



Figura 77 – Ensaio mecânico de flexão.



Figura 78 – Ensaio mecânico de flexão, mistura TAPMCAR 4.5.



Figura 79 – Ensaio mecânico de compressão.



Figura 80 – Ensaio mecânico de compressão, mistura TAPMCAR 4.5.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de flexão das composições TAPMCAR 4.5 e TAPMCARF5.1.

Mistura-Provetes	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Variação (%)
TAPMCAR 4.5 – P1.1	1,66	1,70	0,04	2,6
TAPMCAR 4.5 – P1.2	1,73			
TAPMCAR 4.5 – P2.1	1,77			
TAPMCAR 4.5 – P2.2	1,69			
TAPMCAR 4.5 – P3.1	1,69			
TAPMCAR 4.5 – P3.2	1,66			
TAPMCARF 5.1 – P1.1	1,59	1,68	0,09	5,1
TAPMCARF 5.1 – P1.2	1,78			
TAPMCARF 5.1 – P2.1	1,55			
TAPMCARF 5.1 – P2.2	1,70			
TAPMCARF 5.1 – P3.1	1,70			
TAPMCARF 5.1 – P3.2	1,73			

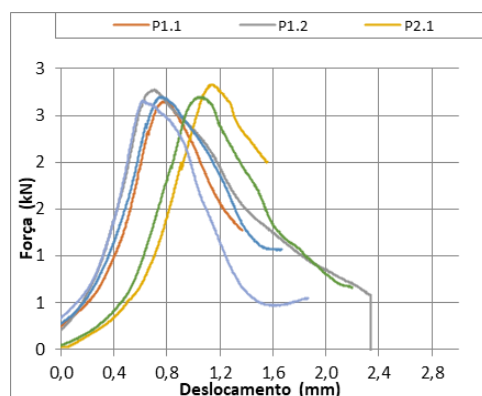


Gráfico 10 – Resistência à compressão dos provetes da composição TAPMCAR 4.5.

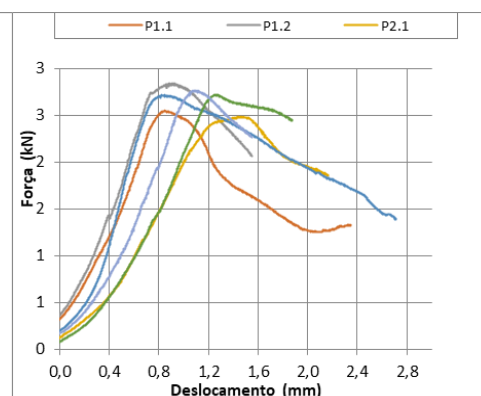


Gráfico 11 – Resistência à compressão dos provetes da composição TAPMCARF 5.1.

- **Ensaio de absorção de água por imersão parcial:** O ensaio foi baseado na Norma Europeia ISO 15148:2002, que estabelece o coeficiente de absorção de água em materiais do setor da construção. Este teste se procedeu através da inserção das amostras, com suas respectivas massas estabilizadas, dentro de um reservatório de água por no mínimo de 24 horas (International Organization for Standardization, 2002).

Assim, para a realização deste ensaio de absorção de água foram selecionadas as seguintes misturas: TAPMCARF 5.1, TAPMCARFO 6.5, TAPMCARFCC 7.4, TAPMCARFS 8.3 e TAPMCARFOSCC 9.1. Inicialmente, desenvolveram-se três amostras de prisma de cada uma das composições selecionadas, de modo a totalizarem uma área de contato com água de 204cm².

Após a secagem natural das amostras em um ambiente com temperatura e humidade controlada durante 29 dias, as amostras foram levadas para a estufa WTB Binder, com o objetivo de acelerar a cura e obter a estabilização da massa dos provetes. O processo de secagem das amostras dentro da estufa teve como objetivo estabilizar o provete em 0,1% da massa total, em um mínimo de 24 horas, seguindo a recomendação da norma. Desta forma, as amostras passaram por um total de 7 medições de massas, em uma balança de precisão Sartorius, em um período de 14 dias dentro da estufa à 50°C, com o propósito de mantê-las totalmente estáveis (tabela 22).

Tabela 22 – Estabilização das composições para ensaio de absorção de água.

Mistura	Dia 23/05 (g)	Dia 27/05 (g)	Dia 28/05 (g)	Dia 29/05 (g)	Dia 03/06 (g)	Dia 04/06 (g)	Dia 05/06 (g)
TAPMCARF 5.1.0	341,99	341,70	341,68	341,80	341,53	341,63	341,62
TAPMCARF 5.1.1	355,43	355,07	355,04	355,18	354,91	354,99	355,03
TAPMCARF 5.1.2	350,94	350,76	350,73	350,91	350,63	350,68	350,70
TAPMCARFO 6.5.0	370,53	370,25	370,21	370,37	370,11	370,18	370,10
TAPMCARFO 6.5.1	366,85	366,47	366,43	366,57	366,26	366,33	366,38
TAPMCARFO 6.5.2	363,67	363,34	363,33	363,49	363,23	363,33	363,34
TAPMCARFCC 7.4.0	360,47	360,22	360,19	360,32	359,97	360,03	359,88
TAPMCARFCC 7.4.1	381,81	381,61	381,54	381,68	381,39	381,51	381,55
TAPMCARFCC 7.4.2	383,67	383,47	383,42	383,56	383,27	383,37	383,41
TAPMCARFS 8.3.0	350,68	350,30	350,29	350,28	350,01	350,11	350,11
TAPMCARFS 8.3.1	368,00	367,66	367,62	367,69	367,41	367,51	367,58
TAPMCARFS 8.3.2	385,67	385,23	385,20	385,33	385,03	385,19	385,24
TAPMCARFOSCC 9.1.0	361,33	360,86	360,83	361,02	360,72	360,81	360,74
TAPMCARFOSCC 9.1.1	344,32	344,04	344,02	344,11	343,85	343,94	343,68
TAPMCARFOSCC 9.1.2	354,63	353,97	353,93	354,11	353,79	353,89	353,93

Posterior à estabilização das amostras, no sétimo dia de pesagem das amostras, estas passaram pelo processo de vedação das laterais, com a aplicação de uma membrana elástica impermeável, para que assim a absorção da água se mantivesse na área desejada. Assim, o ensaio se iniciou no dia subsequente com a divisão dos seguintes horários de pesagem dos provetes: 0min, 5min, 20min, 1h, 2h, 2h30min, 3h, 4h, 8h e 24h (tabela 23).

Tabela 23 – Ensaio de absorção de água por imersão parcial.

Mistura	0min (g)	5min (g)	20min (g)	1h (g)	2h (g)	2h30min (g)	3h (g)	4h (g)	8h (g)	24h (g)
TAPMCARF 5.1.0	359,52	380,51	400,4	433,08	438,71	438,92	439,1	439,41	440,1	441,59
TAPMCARF 5.1.1	378,46	404,99	422,56	453,8	462,74	463,06	463,27	463,72	464,47	465,94
TAPMCARF 5.1.2	374,1	399,98	417,32	448,87	456,69	457,02	457,24	457,47	458,37	459,65
TAPMCARFO 6.5.0	392,66	393,96	394,24	395,1	395,93	396,32	396,61	397,18	398,89	402,7
TAPMCARFO 6.5.1	392,17	393,54	393,82	394,6	395,4	395,87	396,19	396,73	398,66	402,72
TAPMCARFO 6.5.2	386,46	387,91	388,21	388,97	389,81	390,18	390,38	390,93	392,6	395,8
TAPMCARFCC 7.4.0	381,02	411,78	429,88	462,53	467,77	467,92	468,08	468,56	469,26	470,74
TAPMCARFCC 7.4.1	408,55	440,22	456,24	487,38	497,22	497,52	497,68	497,97	498,8	500,39
TAPMCARFCC 7.4.2	402,73	428	446,32	476,34	494,83	495,24	495,45	495,97	496,64	498,03
TAPMCARFS 8.3.0	373,68	402,27	422,89	456,67	462,94	462,93	463,26	463,6	464,26	465,59
TAPMCARFS 8.3.1	388,26	422,61	443,7	475,01	481,71	481,92	482,18	482,43	483,02	484,22
TAPMCARFS 8.3.2	404,52	432,96	450,11	478,57	501,13	501,31	501,58	501,83	502,45	503,52
TAPMCARFOSCC 9.1.0	383,77	385,59	386,4	387,62	389,12	389,58	390,06	391,05	393,77	400,94
TAPMCARFOSCC 9.1.1	366,51	368,4	369,15	370,44	371,81	372,2	372,69	373,55	376,16	383,08
TAPMCARFOSCC 9.1.2	374,07	376,03	376,7	377,73	379,03	379,4	379,81	380,82	382,7	387,65

Com base nos dados obtidos através das pesagens das amostras ao passar do tempo (gráfico 12), foi perceptível que as misturas que apresentavam óleo em sua composição obtiveram um menor acréscimo da sua massa com o decorrer do ensaio.

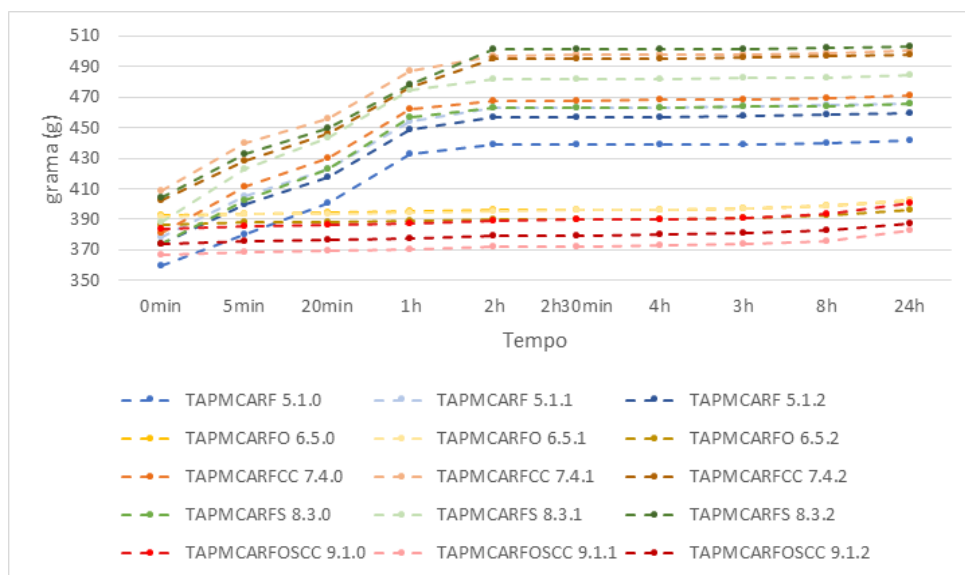


Gráfico 12 – Gráfico da diferença da massa em relação ao tempo.

Tabela 24 – Tabela de símbolos e unidades (adaptação da Norma Europeia ISO 15148:2002).

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da face	m ²
$\Delta m t$	Ganho de massa por área da face após o tempo	kg/ m ²
t	Tempo	h
Ww	Coeficiente de absorção de água	kg/(m ² ·h ⁰ ·*)

Assim, para compreender a diferença das massas iniciais das amostras e as massas obtidas ao decorrer das pesagens em relação à sua área de contato com a água, foi realizado o cálculo base “ $\Delta m t = (m t - m i) / A$ ” (tabela 24), conforme disposto na norma ISO 15148:2002, obtendo os seguintes resultados (tabela 25):

Tabela 25 – Diferença entre a massa inicial e a pesagem ao passar do tempo pela área.

Mistura	0min	5min	20min	1h	2h	2h30min	4h	3h	8h	24h
TAPMCARF 5.1.0	0,00	3,28	6,39	11,49	12,37	12,41	12,43	12,48	12,59	12,82
TAPMCARF 5.1.1	0,00	4,15	6,89	11,77	13,17	13,22	13,25	13,32	13,44	13,67
TAPMCARF 5.1.2	0,00	4,04	6,75	11,68	12,90	12,96	12,99	13,03	13,17	13,37
TAPMCARFO 6.5.0	0,00	0,20	0,25	0,38	0,51	0,57	0,62	0,71	0,97	1,57
TAPMCARFO 6.5.1	0,00	0,21	0,26	0,38	0,50	0,58	0,63	0,71	1,01	1,65
TAPMCARFO 6.5.2	0,00	0,23	0,27	0,39	0,52	0,58	0,61	0,70	0,96	1,46
TAPMCARFCC 7.4.0	0,00	4,81	7,63	12,74	13,55	13,58	13,60	13,68	13,79	14,02
TAPMCARFCC 7.4.1	0,00	4,95	7,45	12,32	13,85	13,90	13,93	13,97	14,10	14,35
TAPMCARFCC 7.4.2	0,00	3,95	6,81	11,50	14,39	14,45	14,49	14,57	14,67	14,89
TAPMCARFS 8.3.0	0,00	4,47	7,69	12,97	13,95	13,95	14,00	14,05	14,15	14,36
TAPMCARFS 8.3.1	0,00	5,37	8,66	13,55	14,60	14,63	14,68	14,71	14,81	14,99
TAPMCARFS 8.3.2	0,00	4,44	7,12	11,57	15,10	15,12	15,17	15,20	15,30	15,47
TAPMCARFOSCC 9.1.0	0,00	0,28	0,41	0,60	0,84	0,91	0,98	1,14	1,56	2,68
TAPMCARFOSCC 9.1.1	0,00	0,30	0,41	0,61	0,83	0,89	0,97	1,10	1,51	2,59
TAPMCARFOSCC 9.1.2	0,00	0,31	0,41	0,57	0,77	0,83	0,90	1,05	1,35	2,12

Durante o processo de pesagem foi observado que as amostras que não apresentavam o óleo de cozinha absorviam mais água, de modo que as misturas TAPMCARF 5.1.0, TAPMCARF 5.1.1, TAPMCARF 5.1.2, TAPMCARFCC 7.4.0, TAPMCARFCC 7.4.1, TAPMCARFS 8.3.0 e TAPMCARFS 8.3.1, já se apresentavam saturadas na primeira hora de ensaio, com suas faces superiores húmidas. Posterior, decorrido a segunda hora de teste, as amostras TAPMCARFCC 7.4.2 e TAPMCARFS 8.3.1, também se apresentaram saturadas (figura 81).



Figura 81 – Ensaio de absorção de água após decorrido 2h do teste.

Posterior as observações visuais e as pesagens das massas das amostras, foi possível realizar o cálculo do coeficiente de absorção de água (tabela 26), $W_w = \Delta m' / \sqrt{t_f}$ estabelecida pela norma ISO 15148:2002, presente em cada uma das amostras. Este valor resultante da fórmula serve como um indicador da capacidade de absorção de água presente nas misturas analisadas, permitindo a comparação com as demais composições.

Tabela 26 – Coeficiente de absorção de água, unidade de medida $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$.

Mistura	0min	5min	20min	1h	2h	2h30min	4h	3h	8h	24h
TAPMCARF 5.1.0	0,00	11,36	11,06	11,49	8,75	7,85	7,18	6,24	4,45	2,62
TAPMCARF 5.1.1	0,00	14,36	11,93	11,77	9,31	8,36	7,65	6,66	4,75	2,79
TAPMCARF 5.1.2	0,00	14,01	11,70	11,68	9,12	8,19	7,50	6,51	4,66	2,73
TAPMCARFO 6.5.0	0,00	0,70	0,43	0,38	0,36	0,36	0,36	0,35	0,34	0,32
TAPMCARFO 6.5.1	0,00	0,74	0,45	0,38	0,36	0,37	0,36	0,36	0,36	0,34
TAPMCARFO 6.5.2	0,00	0,78	0,47	0,39	0,37	0,37	0,35	0,35	0,34	0,30
TAPMCARFCC 7.4.0	0,00	16,65	13,22	12,74	9,58	8,59	7,85	6,84	4,87	2,86
TAPMCARFCC 7.4.1	0,00	17,14	12,91	12,32	9,80	8,79	8,04	6,99	4,99	2,93
TAPMCARFCC 7.4.2	0,00	13,68	11,80	11,50	10,18	9,14	8,36	7,28	5,19	3,04
TAPMCARFS 8.3.0	0,00	15,47	13,32	12,97	9,86	8,82	8,08	7,03	5,00	2,93
TAPMCARFS 8.3.1	0,00	18,59	15,00	13,55	10,32	9,26	8,47	7,36	5,23	3,06
TAPMCARFS 8.3.2	0,00	15,39	12,34	11,57	10,67	9,56	8,76	7,60	5,41	3,16
TAPMCARFOSCC 9.1.0	0,00	0,99	0,71	0,60	0,59	0,57	0,57	0,57	0,55	0,55
TAPMCARFOSCC 9.1.1	0,00	1,02	0,71	0,61	0,59	0,56	0,56	0,55	0,53	0,53
TAPMCARFOSCC 9.1.2	0,00	1,06	0,71	0,57	0,55	0,53	0,52	0,53	0,48	0,43

Ademais, os valores resultantes do coeficiente de absorção de água são analisados através de sua inserção em um gráfico (gráfico 13). Assim, a leitura do desempenho das misturas tornou-se mais simplificada, evidenciando aquelas composições que saturaram e obtiveram a maior absorção de água. Estas, manifestaram-se com um maior ganho de massa nas primeiras horas, e em seguida mantiveram uma constância na absorção (gráfico 14). Em contraponto, as amostras com baixa absorção de água apresentaram um ganho de massa gradativo e linear.

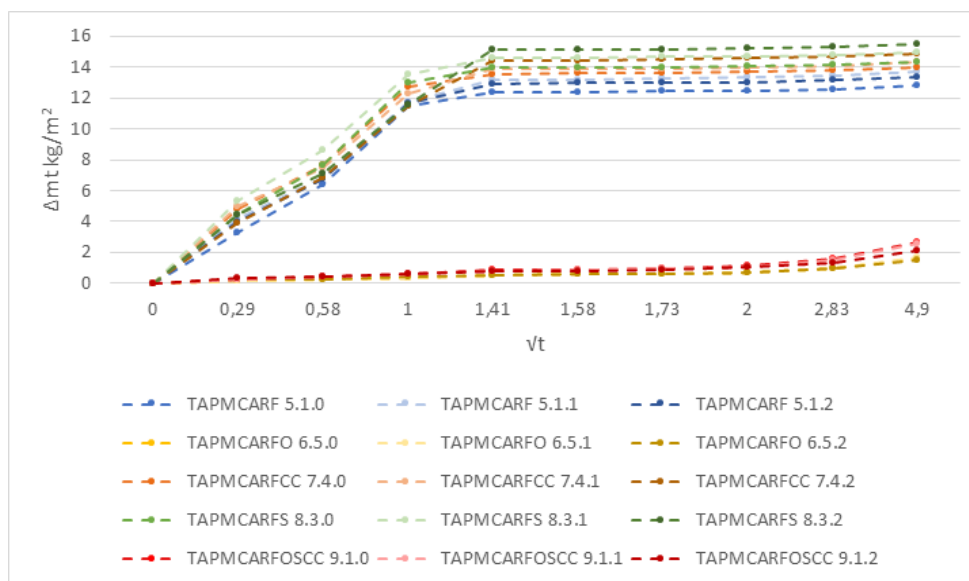


Gráfico 13 – Gráfico do coeficiente de absorção de água.

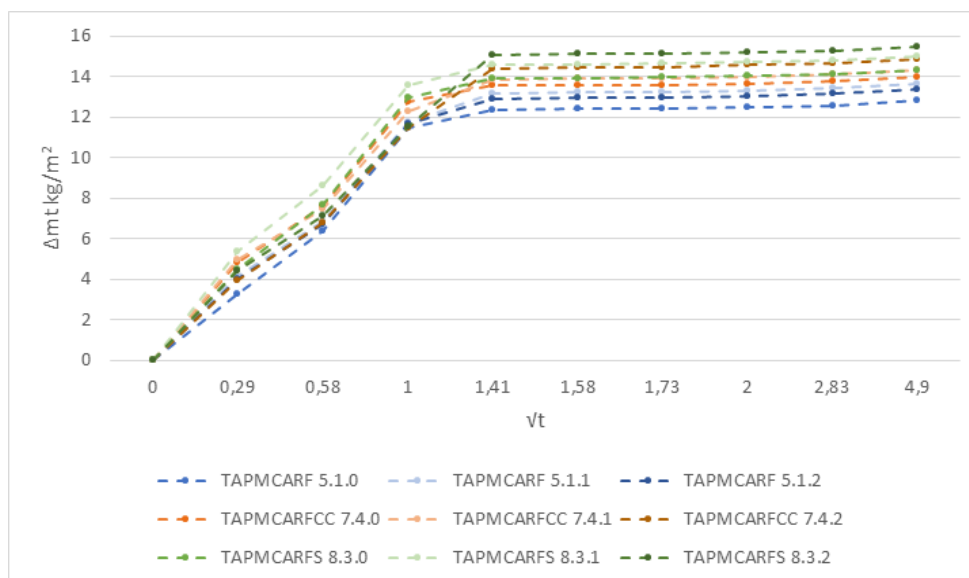


Gráfico 14 – Gráfico de absorção de água das misturas com saturação durante o tempo.

Por meio das análises desenvolvidas, foi possível compreender que mesmo com a saturação das misturas que apresentaram o cacto, a composição TAPMCARFCC 7.4.2 não saturou na primeira hora. Assim, esta disposição referida anteriormente com a amostra 7.4.2 potencializa o possível uso da mistura, com a ressalva da necessidade de se aplicar uma proteção nas faces das misturas, visto que houve a sua saturação posteriormente.

O melhor desempenho do material quanto à repelência à água foi adquirido pela mistura que agrega o resíduo de óleo de cozinha, TAPMCARFO 6.5 (figura 82). Entretanto, como observado no ensaio de extrusão na impressora DELTA WASP 40100 (Etapa 02), esta composição apresenta mais fissuras ao passar do tempo e uma maior dificuldade de extrusão, em comparação com a TAPMCARFCC 7.4, fatores estes que desfavorecem a sua aplicação.

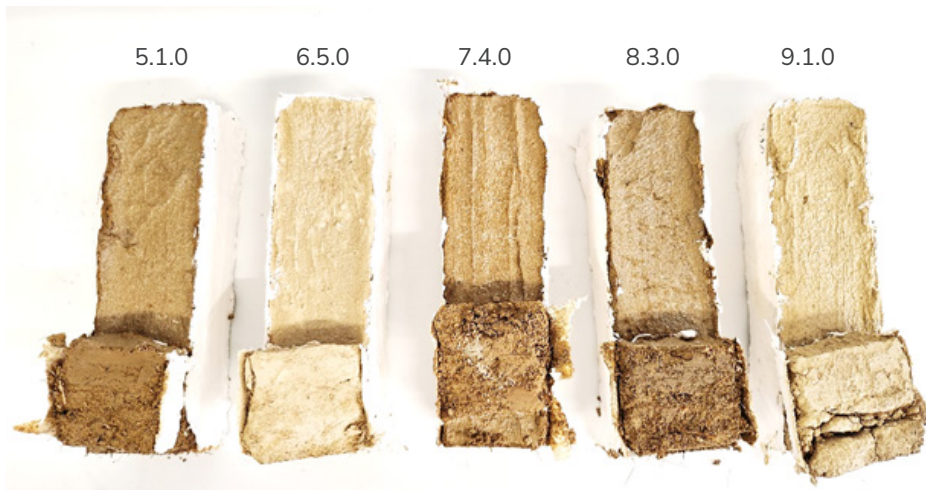


Figura 82 – Ensaio de absorção de água após decorrer 24h do teste.

3.8 Seleção da composição

Os ensaios realizados anteriormente na Etapa 1, 2 e 3 serviram de base para a escolha da mistura ideal para o prosseguimento desta investigação. Assim, fundamentado nos resultados encontrados, foi possível identificar que é essencial que a escolha da composição se alinhe com os requisitos necessários para a sua aplicação na impressora DELTA WASP 40100 e com a função que o produto irá realizar. Desta forma a composição TAPM-CARFCC 7.4 se tornou a escolhida, visto que apresenta homogeneidade na mistura, boa trabalhabilidade, adequada fluidez, bom potencial de construção de camadas. Além disso, a mistura adquiriu menos fissuras após a secagem da impressão teste, o que pode auxiliar a evitar a passagem de água diretamente, como pode-se observar no estudo da Etapa 2. Todavia, é válido ressaltar que a composição com o cacto não apresentou a melhor resposta contra a absorção à água, requisito pertinente para a promoção de uma maior aceitabilidade do material pelo mercado da construção civil.

3.9 Etapa 4 - Desenvolvimento do produto

Em Freitas et al. (2013, p. 13) a idealização de um produto requer a exploração diversificada do conhecimento, de modo a solucionar uma problemática específica.

Em resposta a metodologia aplicada, MDD, o desenvolvimento de um produto é a validação do material criado. Assim, visto que a composição foi concebida com o intuito de atender o setor da construção civil, o produto em questão tem a função de demonstrar as vantagens e os desafios da aplicação prática do material aprimorado na fabricação aditiva, além de ilustrar seu potencial impacto na indústria de destino.

3.9.1 Conceito

A terra crua desempenha funções fundamentais para o desenvolvimento dos seres humanos no planeta Terra, como a capacidade de produzir alimentos, filtrar a água, regularizar o clima e manter a biodiversidade local. Com a evolução humana, o solo apresentou outros papéis fundamentais, como no setor da construção, através da produção de paredes, pisos, rebocos, colunas, blocos moldados, entre outros elementos. Assim, a aplicação deste material na sociedade começou a ser multifuncional e básico para a evolução, visto que as construções surgiram com um papel inicial de proteger o ser humano contra intempéries da natureza (Freire, 1999).

Anterior a aplicação da terra crua na construção de paredes, os hominídeos protegiam-se em “cavidades rochosas” contra intempéries (Freire, 1999). Assim, entende-se que a constituição de um abrigo apoia à evolução humana desde os primórdios, fundamentando a identidade do ser humano contemporâneo.

Desta forma, unindo a demanda atual de se ter uma construção sustentável, e a necessidade básica do ser humano de obter um elemento que o proteja, o produto desta dissertação se desenvolve em volta da produção de um mobiliário urbano que emita o sentimento de proteção e conforto. Com isso, esta produção busca resgatar a identidade da evolução humana, com as texturas orgânicas presente nas cavidades rochosas, em consonância com as necessidades contemporâneas. Ademais, o elemento criado não apresenta o intuito de ser um elemento urbano de cobertura ou fechado, mas sim de envolver e acolher o utilizador, como a função exercida por uma parede em proteger e um banco ao promover conforto.

3.9.2 Processo

Abrigo

Os hominídeos quando habitavam o planeta Terra há mais de 5.300.000 anos, ocupavam as cavernas e cavidades rochosas, de modo a se protegerem contra intempéries da natureza (UNESCO Office in Brasília, 2010). Estas cavernas são a base estética para o desenvolvimento do mobiliário urbano, visto que apresentam texturas orgânicas que fomentam o sentimento de acolhimento que é desejado disseminar.

Inicialmente, os primeiros locais de fixação dos *homos sapiens* foram adquiridos com o propósito de atender a necessidade de sobrevivência, como um refúgio temporário para seres vulneráveis e armazenamento de comida (Gressler, 2007, p. 66). Atualmente, a função de habitar um lugar se apresenta como uma herança dos hominídeos que habitavam as cavernas rochosas. Posteriormente, foi observado um movimento do ser humano de

“fincar raízes” por onde passava, de modo a construírem as casas (Gressler, 2007, p. 66). Neste processo, com a falta de uma preexistência para habitar o local desejado, houvesse a necessidade de se criar o próprio abrigo. Desta forma, as primeiras construções feitas pelos humanos aplicavam materiais naturais, acessíveis, abundantes e do lugar, como a terra crua em construções vernaculares.

Em seguida, durante a revolução industrial foi observado que a casa deixou de apresentar apenas a função básica de gerar segurança para as pessoas, e começou a transmitir o status social da pessoa que a habitava (Gressler, 2007, p. 66). Deste modo, o abrigo não dependia apenas da necessidade humana, mas também da sua condição econômica, e como consequência nem todas as pessoas na atualidade conseguem fazer o uso de um abrigo concreto (figura 83). Assim, a realidade presente hoje é que cada vez mais existem seres humanos vivendo em situação de rua (Sicari & Zanella, 2018), de forma que estes resgatam diariamente a essência de habitar pela proteção.

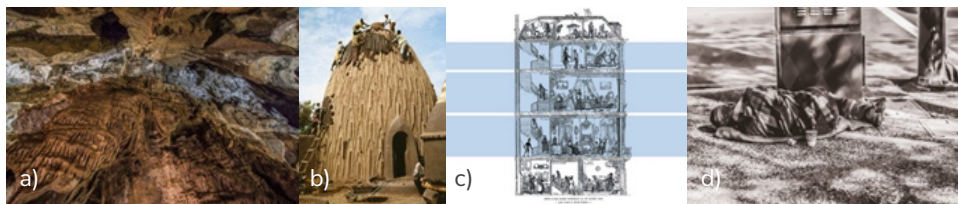


Figura 83 – Composição de imagens comparativas de abrigos; a) Caverna Swartkrans habitada por hominídeos (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024b); b) Casa vernacular tradicional Tolek (Franco, 2014); c) “Seção de um edifício parisiense, 1845, via biliotheque Nationale de France” (ArchDaily, 2021); d) Pessoa em situação de rua, foto de Marcos Santos/USP imagens (Ministério dos direitos humanos e da cidadania - Governo Federal Brasil, 2023)

A situação presente na atualidade está em constante diálogo com o nosso passado, uma vez que a luta constante pelo abrigo se estende pela necessidade de proteção. Assim, a essência do uso do termo “abrigo” no mobiliário a ser desenvolvido é o resgate de um sentimento de acolhimento, de modo a dialogar com as necessidades contemporâneas de conforto e iluminação.

Cavidade rochosa

Dentre os locais historicamente habitados pelos hominídeos, estão as cavernas: Sterkfontein, Swartkrans e Kromdraai (figura 84) (UNESCO Office in Brasilia, 2010). A caverna Sterkfontein é considerada um Patrimônio Mundial pela UNESCO, pois exibe um período significativo para a evolução humana. Além disso, fósseis foram encontrados no local, decorrentes da extração de cal da sua região, no período de 1890. Posteriormente, em 1930 se direcionou a busca pela arqueologia do lugar, de modo que encontraram fósseis de Australopitecos (UNESCO, 1999). A Swartkrans,

também se apresenta na lista de Património Mundial, pelo mesmo motivo do Sterkfontein, uma vez que apresentava fósseis de *Paranthropus*, além de evidências do controle de fogo pelos homínídeos (UNESCO, 1999). Já a caverna Kromdraai, também foi inserida na lista de Património Mundial, pelo mesmo motivo das demais, visto que constituía de uma seleção de fósseis de *Paranthropus* e *Australopithecus* (UNESCO, 1999).

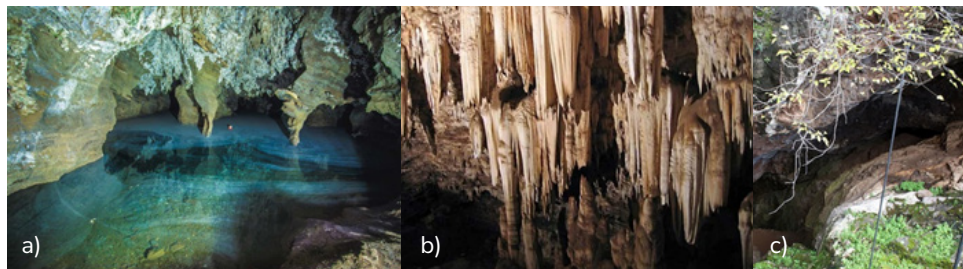


Figura 84 – Composição de imagens das cavernas; a) Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a); b) Kromdraai (Botha, 2024); c) Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024b).

Desta forma, estas evidências demonstram que as cavernas eram os locais onde os nossos antepassados sobreviveram há milhares de anos atrás, de modo a enfatizar uma ligação entre o lugar e a identidade da evolução até os seres humanos.

Paredes

A palavra parede tem sua origem etimológica do latim (*paries*), e é definida como um elemento que delimita um ambiente, protegendo quem faz uso desta contra intempéries. Segundo a UNESCO Office in Brasília (2010, p. 372), durante o período Mesolítico foi observado a aplicação de galhos e palhas para a obtenção de abrigos, com a função de proteger aqueles que habitavam o lugar. Esta solução anterior se assemelha com a aplicação das paredes na atualidade, assim como o uso das cavernas anteriormente.

As paredes atualmente são obtidas através dos esforços humanos, com base em parâmetros de medidas mínimas para o conforto dos usuários. Estes parâmetros foram desenvolvidos ao passar dos anos, através de normas que garantem um padrão de escala convencional para atender o ser humano. Assim, o autor Neufert (1998, p. 18) descreve a importância de um projetista saber os parâmetros mínimos necessários para se desenvolver um projeto, de forma que atenda a necessidade daquele que utiliza o espaço.

Segundo Neufert (1998, p. 21), as distâncias necessárias entre as paredes podem variar a depender da quantidade de pessoas que vão conviver no espaço. Além disso, a função do lugar também pode delimitar o seu tamanho, visto que no mundo contemporâneo os ambientes receberam funcionalidades distintas de apenas promover a proteção. Desta forma,

exemplificando nas medidas gerais precisas para uma parede, é possível levar em consideração as medidas ergonômicas de uma pessoa com estatura média. Para Neufert (1998) é possível encontrar algumas dessas referências de medidas ergonômicas, onde os pés direitos podem variar em: cave $\leq 2,5\text{m}$; rés-do-chão $\leq 3,5\text{m}$; demais andares $\leq 3,0\text{m}$. Todavia, como observado na figura 85, é possível identificar o tamanho mínimo necessário para emitir a proteção para uma pessoa, de modo que o projeto acolha a altura de um ser humano em distintas posições.

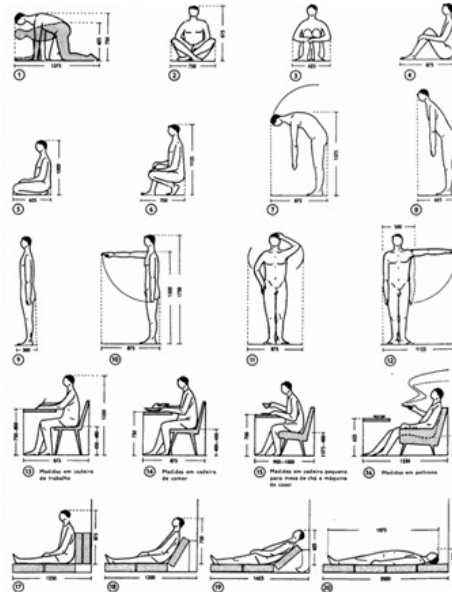


Figura 85 – Referência ergonômica para atender ao ser humano (Neufert, 1998, p. 20).

A espessura necessária para sustentar uma parede pode variar em consonância com especificações técnicas do material utilizado. A aplicação da terra crua em uma parede, por exemplo, precisa de uma espessura maior do que a de betão, visto que as resistências mecânicas dos materiais são distintas (Neufert, 1998).

Além disso, a parede desempenha funções construtivas distintas, dependendo da sua localização de implantação, interna ou externa a um ambiente fechado. No caso da inserção de uma parede em um local aberto, é importante que esta apresente algumas características básicas como: resistência à água, isolamento térmico, resistência ao vento, proteção contra radiação solar e isolamento acústico. No desenvolvimento de uma parede interna, é necessário levar em consideração as seguintes questões: isolamento acústico e térmico, compatibilidade com instalações, facilidade de manutenção, segurança contra incêndio, e em alguns casos acabamento estético. Com base nestas informações, torna-se mais viável compreender a aplicação e as necessidades que o projeto em desenvolvimento demandará.

Paredes impressas

Na atualidade é possível identificar que grande parte das paredes encontradas no mercado são constituídas por: betão, blocos cerâmicos, dentre outros materiais. Desta forma, no cenário urbano atual é possível observar uma estética padronizada das vedações, com geometrias semelhantes a prismas retangulares.

Entretanto, com o avanço tecnológico e o uso da fabricação aditiva no setor da construção é possível sugerir uma nova expressão para este elemento arquitetónico, uma vez que a I3D potencializa a capacidade geométrica, como observado na Casa Tova (figura 86). Além disso, outro fator que difere a construção convencional da impressão 3D é a possível adaptação da função, um exemplo é o aumento do isolamento térmico e ou acústico da parede a depender da necessidade do utilizador, visto o potencial de otimização da tridimensionalidade do produto impresso.



Figura 86 – Casa Tova (Corazza, 2021)

União

Em associação com as necessidades contemporâneas, nasce a vontade de se ocupar o meio urbano. Assim, a presente dissertação visa compilar a função de um elemento que acolhe o ser humano e promove o conforto do mesmo, semelhante a função de proteção de uma parede, mas com a sua disposição no contexto da cidade, empregando soluções para um mobiliário urbano.

Assim, de modo a investir em uma proposta que atenda o “abrigar” e ao

mesmo tempo seja um elemento público, a proposta se volta para a constituição de um mobiliário urbano. De modo que o projeto conversa com o meio de inserção, principalmente ao se utilizar de um material local e da aplicação das novas tecnologias, com o uso da impressão 3D. Além disso, o elemento a ser desenvolvido tende a emitir conforto e sentimento de proteção e acolhimento, resgatando emoções sensoriais presentes nas texturas das paredes das cavidades rochosas.

3.9.3 Produto

O produto a ser desenvolvido é um mobiliário urbano, que promove a aplicação da composição selecionada anteriormente na Etapa 3, TAPMCAR-FCC 7.4 (299g de terra crua, 135ml de água, 67g de pó de mármore, 67g de cal, 66g de areia, 1g de fibra e 58g de polpa de cacto), de forma a validar o material desenvolvido através da sua impressão 3D. Em consonância com o conceito previsto, o elemento desenvolvido pretende emitir uma sensação de proteção para os usuários, resgatando a identidade presente na evolução humana disposta pelos primeiros abrigos utilizados, as cavidades rochosas.

Ademais, a possibilidade de impressão 3D no local de aplicação do produto também resgata a ancestralidade, uma vez que nas construções vernaculares os materiais utilizados eram obtidos no mesmo local da sua produção. Desta forma, os processos se assemelham no aspecto de desenvolvimento, visto que a proposta na dissertação também investe na sua produção no local de aplicação, utilizando um material do lugar.

Com isso, o programa que delimita a função global do presente mobiliário une diversas necessidades humanas contemporâneas, como a inserção de um espaço para proliferação da natureza local, um banco de apoio para aqueles que necessitam de um descanso, o resgate da textura presente nas cavernas e a inserção de uma faixa de luz. Este último elemento, além de aumentar a funcionalidade do mobiliário, permite que o cidadão observe o espaço do entorno, “chamando” o mesmo para descobrir o projeto. Além disso, por meio da inclusão da iluminação é possível realizar uma analogia com a luz no fim da caverna, que “chama” o ser humano para o ambiente externo.

Banco

A criação do banco tem como função promover um ambiente de descanso e conforto, se alinhando com as necessidades atuais das pessoas que fazem uso do espaço urbano. Este elemento urbano é comumente encontrado em diversos espaços públicos, como calçadas e praças, de forma que ajudam a demarcação e organização da paisagem, além de promoverem a interação social, tornando o ambiente mais convidativo e acolhedor.

Com base em uma recolha de bancos disponíveis no mercado (figura 87), foi possível identificar um padrão ergonómico das medidas necessárias para os utilizadores se sentirem confortáveis. Estas dimensões variam com uma profundidade do assento entre 400mm e 560mm, altura mínima de 440mm e largura 1450mm e 3000mm.

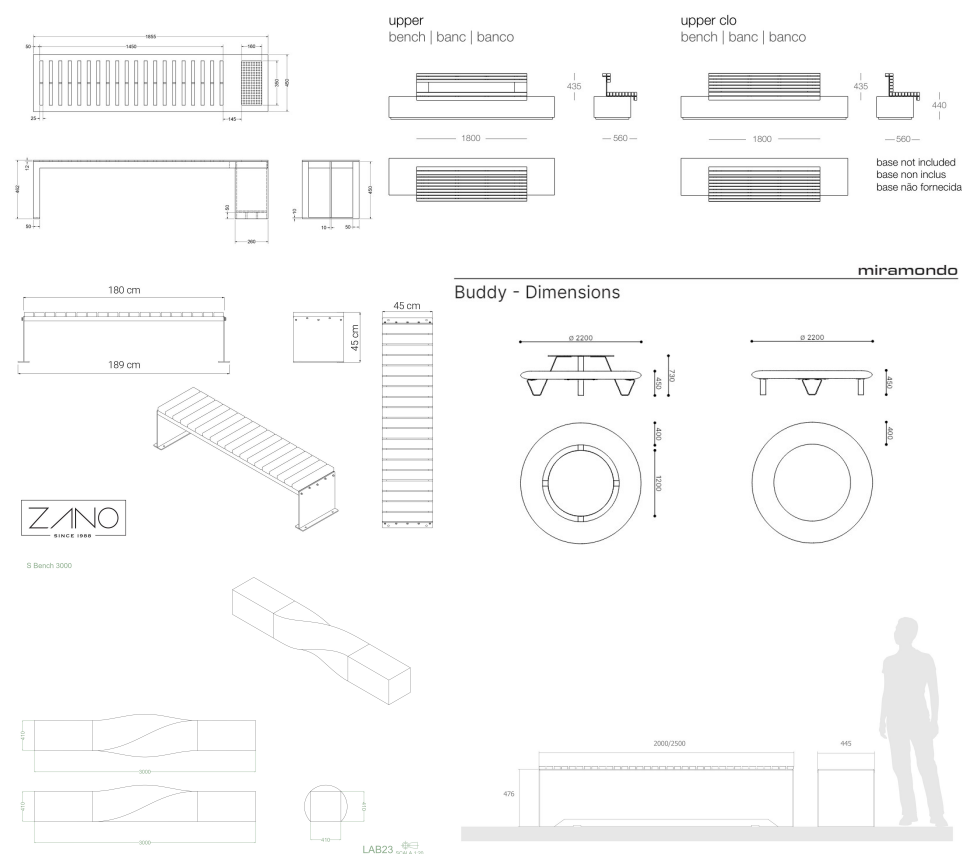


Figura 87 – Composição de bancos presentes no mercado a) Banco Urbano BASO (STODIS, n.d.); b) Upper (Pereira & Oliveira, 2023); c) Banco Domino 02.440 (ZANO Mobiliário Urbano, n.d.); d) Buddy (miramondo, n.d.); e) BENCHES: S (Martinez, 2017); f) Banco Bloco Parque (microcubo, n.d.).

Iluminação

A inserção de um elemento que emite luz no cenário urbano tem como finalidade facilitar o deslocamento seguro dos pedestres, além de promover a utilização desses espaços e torná-los atrativos. Ademais, a iluminação urbana na contemporaneidade auxilia na identificação da identidade do lugar quando existe a falta da luz natural, transformando o espaço em um ambiente acolhedor.

A iluminação artificial foi criada com o objetivo de promover um melhor conforto aos seres humanos, de modo que ao passar dos anos foram criadas diversas normativas para validar a sua implementação. A luz artificial apresenta diversos parâmetros que controlam sua escolha antes da

aplicação, como a iluminância, a temperatura, a temperatura da cor, a eficiência energética, a dificuldade de manutenção, dentre outros fatores. Na atualidade, a escolha deste elemento muitas vezes não considera a necessidade do pedestre e acaba por responder às necessidades ergonômicas daqueles que se utilizam dos veículos automobilísticos para se locomoverem. Em contraponto a esta situação descrita anteriormente, a presente investigação visa inserir uma iluminação artificial para pedestres, de forma a seguir os parâmetros de estatura média do ser humano, como foi identificada anteriormente no tópico “*Paredes*”.

Assim, fundamentado no Manual de Iluminação Pública - Revisão (2016) foi possível verificar os parâmetros básicos de uma iluminação urbana que emite um maior conforto para os cidadãos, sendo estes adquiridos com:

- Temperatura de cor fria para espaços públicos, visto que aumentam a segurança dos pedestres e visibilidade do entorno;
- Restituição da cor com maior valor, uma vez que o resultado é proporcional ao retorno da cor emitida, assim as luzes Incandescentes e LEDs apresentam uma melhor resposta no Manual de Iluminação Pública;
- Eficácia Luminosa, que identifica um maior efeito da relação do fluxo e da potência adquirida pela luz, das luzes branca de LED;
- Índice de eficiência energética, que se guia por parâmetros pré-definidos associados a escolha da luz;
- Iluminação não intrusiva, com luz direcionada para baixo e sem brilho ofuscante (Manual de Iluminação Pública - Revisão, 2016).

Jardim

Para além disso, a inserção da vegetação no contexto urbano é um benefício tanto ambiental quanto social, uma vez que este elemento da natureza promove a sustentabilidade, através da produção de oxigénio; controla a temperatura do ambiente, através da redução das ilhas de calor; e auxilia no conforto sensorial, decorrente do resgate da identidade local ao utilizar de plantas da região. Assim, as jardineiras aplicadas nas cidades contemporâneas complementam a identidade visual urbana e auxiliam no seu desenvolvimento ambientalmente responsável.

A aplicação da vegetação associada ao mobiliário urbano proposto pela presente dissertação tem como objetivo agregar a diversidade cromática e de textura, além de promover a sustentabilidade, reduzindo o impacto ocasionado pelo setor da construção civil, proveniente das altas taxas de emissões de CO₂. Nesse aspeto, a inserção desse componente natural promove a pluralidade e o desenvolvimento de um design sustentável.

Moodboard / curadoria



Figura 88 – Caverna Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a).

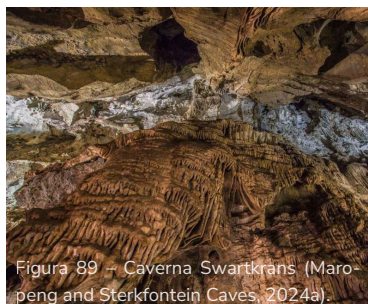


Figura 89 – Caverna Swartkrans (Maropeng and Sterkfontein Caves, 2024a).

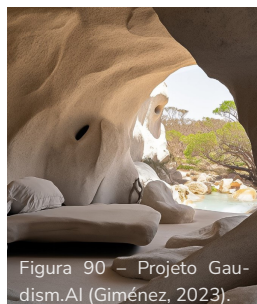


Figura 90 – Projeto Gaudism.AI (Giménez, 2023).



Figura 91 – Projeto Gaudism.AI (Giménez, n.d.)



Figura 92 – Escultura (Baharal, n.d.).

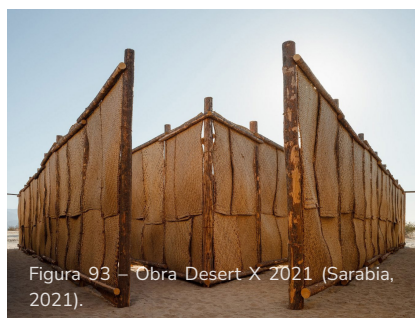


Figura 93 – Obra Desert X 2021 (Sarabia, 2021).



Figura 94 – Construção com terra (Baddad & Santosa, 2020)

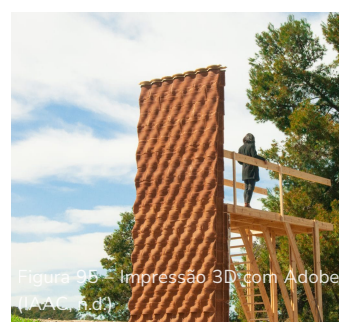


Figura 95 – Impressão 3D com Adobe (PAC, n.d.)



Figura 96 – Museu Nacional do Qatar (Tom Ferguson Photography & Crook, 2019).



Figura 97 – Impressão 3D de peça orgânica (MYCO-CLAY, 2024).

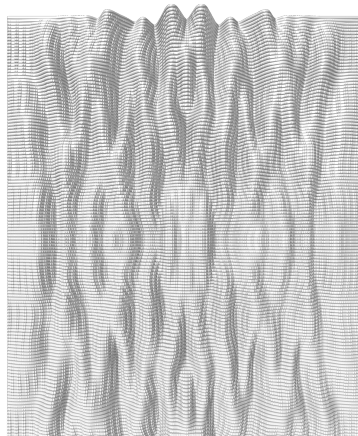


Figura 98 – Projeto Ceramic House (Studio RAP, 2022)



Figura 99 – Projeto New Delft Blue (Studio RAP, 2019)

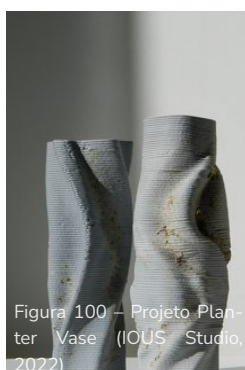


Figura 100 – Projeto Planter Vase (IOUS Studio, 2022)

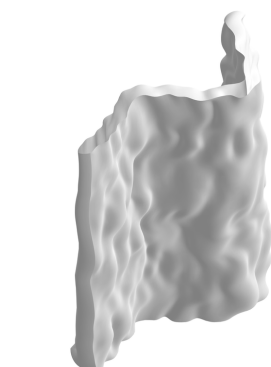


Figura 101 – Projeto 3D-Printed Exterior Wall (IOUS Studio, 2023)

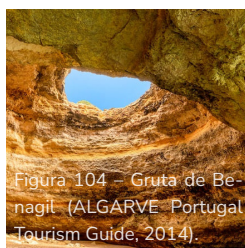


Figura 104 – Gruta de Benagil (ALGARVE Portugal Tourism Guide, 2014).



Figura 105 – Artesanato em impressão 3D (UNFOLD, 2009)

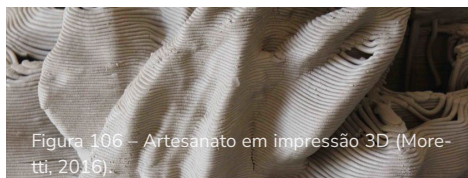


Figura 106 – Artesanato em impressão 3D (Moretti, 2016).

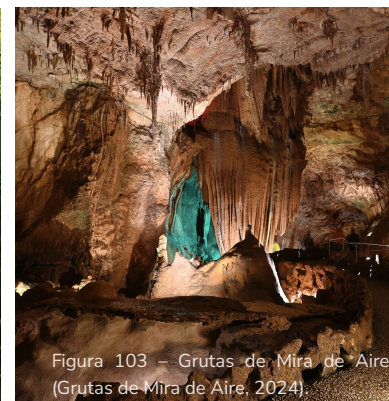


Figura 103 – Grutas de Mira de Aire (Grutas de Mira de Aire, 2024).

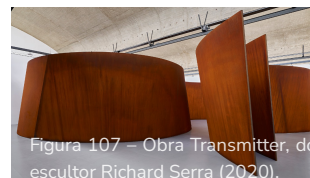


Figura 107 – Obra Transmitter, do escultor Richard Serra (2020).

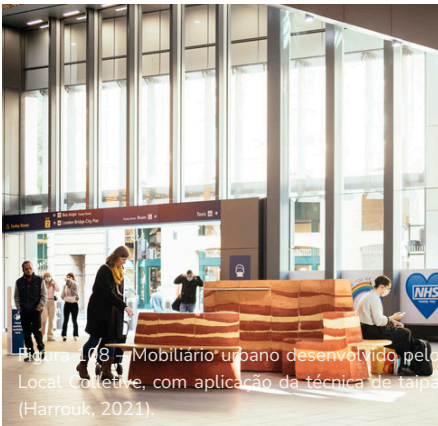


Figura 108 – Mobiliário urbano desenvolvido pelo Local Collective, com aplicação da técnica de talpa (Harrouk, 2021).



Figura 109 – Pavilhão Vara (Ellrichshausen, 2017).

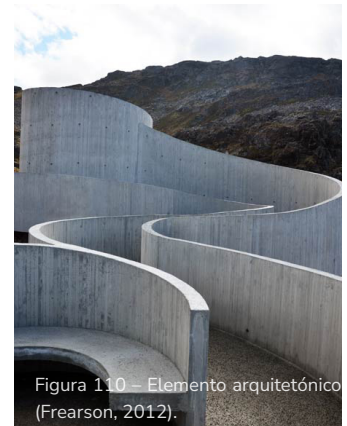


Figura 110 – Elemento arquitetónico (Frearson, 2012).



Figura 111 – Escultura (Buzio, 2009).

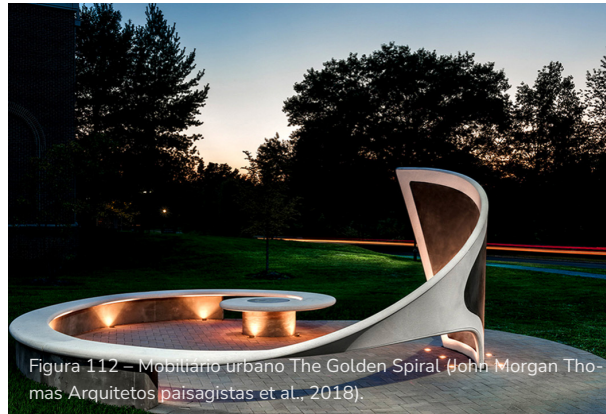


Figura 112 – Mobiliário urbano The Golden Spiral (John Morgan Thomas Arquitetos paisagistas et al., 2018).



Figura 113 – Banco convexo R190-45° (amop synergies, n.d.).



Figura 114 – Mobiliário flexível (MOLO, n.d.).



Figura 115 – Mobiliário urbano (Carlos & Jacinta, n.d.).



Figura 116 – Mobiliário desenvolvido por Rotterdam (Winn, 2019).



Figura 117 – Mobiliário desenvolvido por R3direct (Listek, 2022).



Figura 118 – Instalação criada por Rasem Kamal e Canyon Walls (Stouhi, 2019).



Figura 119 – HOUSE ZERO 3D, produzida por ICON e Lake | Flato Architects (Padla, 2022).



Figura 120 – Vista interna da Sauna Sazae, projetada por Kengo Kuma & Associates (Abdel, 2022).



Figura 121 – Projeto desenvolvido por Advanced Intelligent Systems Technology (Sher, 2021).

Estudo da forma (desenhos)

O desenvolvimento da forma surgiu com base no padrão estético côncavo e convexo presente nas cavernas. Assim, a forma foi traduzida das paredes das cavidades rochosas para o mobiliário urbano (figura 122), que visa transmitir para o utilizador um sentimento de proteção e a contemporaneidade, com a inclusão de elementos que favoreçam o seu conforto, como um banco, vegetação e iluminação.

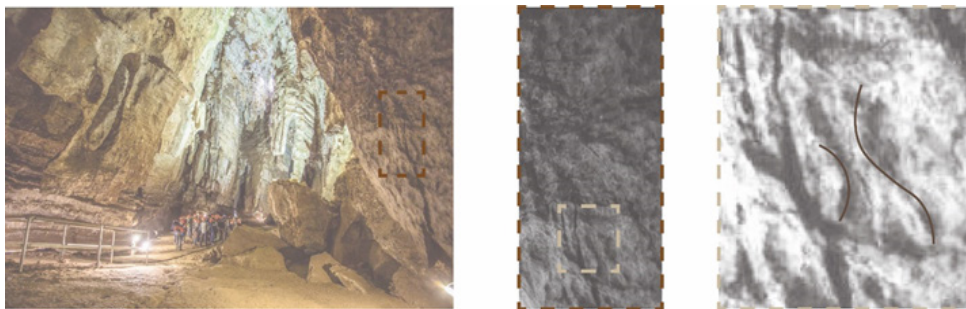


Figura 122 – Estudo da forma.

Deste modo, a construção da forma do mobiliário foi desenvolvida utilizando-se de esboços e maquetes manuais (figura 123). Este método de criação de produto foi de encontro com o estudo do potencial da forma, de maneira a investigar e desenvolver a criatividade da geometria orgânica presente nas referências citadas anteriormente.

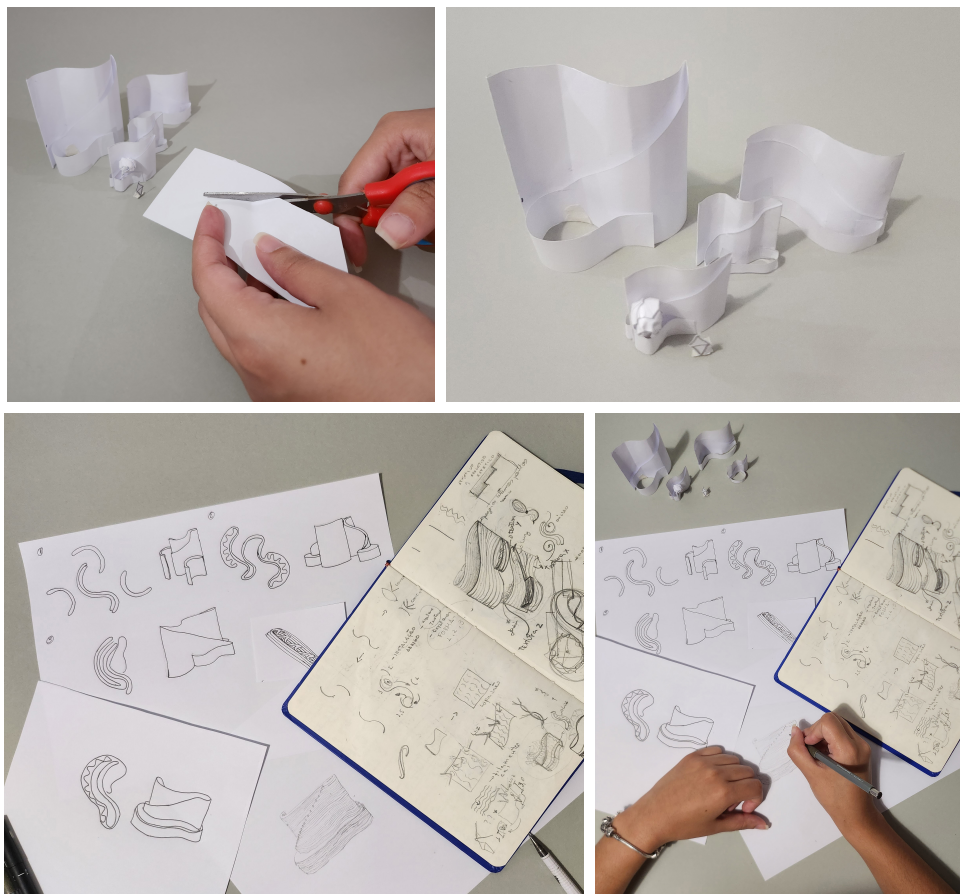


Figura 123 – Estudo da forma com esboços e maquetes manuais.

Estudo da textura

A validação da aplicabilidade da mistura selecionada na impressão em grande escala também se tornou fundamental, visto que o material tem destino de aplicação no setor da construção civil. Desta forma, foram testadas possíveis texturas que a parede do projeto poderia apresentar, levando em consideração sua impressão em escala real. Assim, com o uso da impressora Smart BE MORE 3D's 2500, analisou-se o potencial de impressão em grande escala da composição desenvolvida (figura 124).

O processo de impressão em grande escala foi capaz de filtrar a textura desejada para a aplicação no mobiliário urbano. Além disso, com o decorrer do processo identificou-se que a mistura apresenta uma ótima capacidade de construção e trabalhabilidade para ser aplicado em escala arquitetônica.



Figura 124 – Desenvolvimento da mistura para impressão 3D em grande escala.

Antecedendo o processo da impressão, as texturas foram desenvolvidas com base na estética presente nas cavernas, considerando padrões orgânicos. Assim, foi utilizado o software de modelagem tridimensional Rhinoceros, junto ao plugin Grasshopper (figura 125), com a finalidade de parametrizar a textura adquirida e referenciar as variações dos padrões de cada uma das faces.

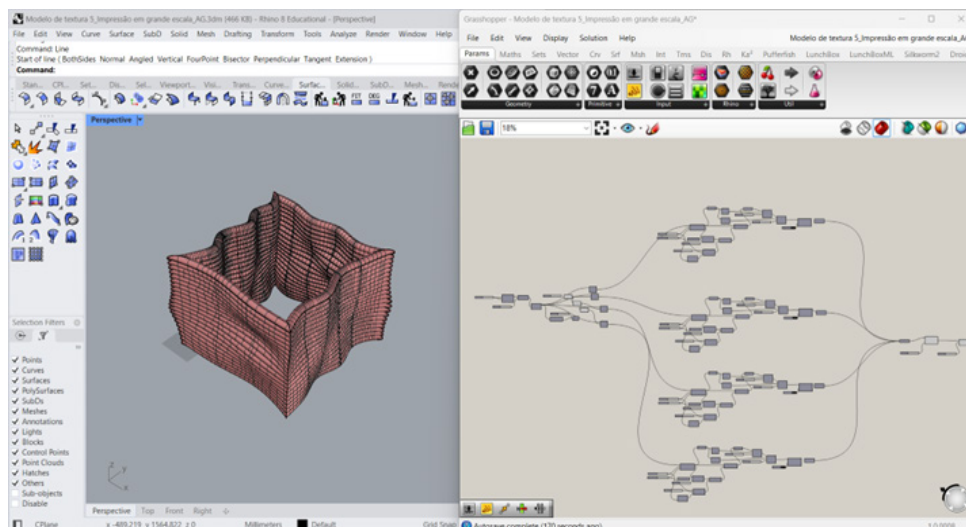


Figura 125 – Desenvolvimento do protótipo da textura.

O protocolo seguido para a efetivação desta impressão levou em consideração o processo realizado em escala reduzida, retratado na Etapa 2. Todavia, visto que os equipamentos se diferem e o peso do material é consideravelmente maior, foi observada a necessidade de um mínimo de quatro pessoas para manuseio do equipamento (figura 126), no caso deste projeto, houve o auxílio de pesquisadores do laboratório Digi – FEUP.



Figura 126 – Desenvolvimento da impressão 3D em grande escala.

Em conclusão do estudo da textura, identificou-se que a face do projeto que mais se destacou foi a com maior variação da forma. Esta superfície apresentou uma maior deslocação no eixo horizontal (figura 127).



Figura 127 – Textura escolhida para aplicação em projeto, escala 1/1.

Modelação 3D

O afinamento da forma e aplicação de uma textura orgânica nas faces do mobiliário urbano, se procedeu através da aplicação do método de modelação 3D semelhante ao realizado anteriormente no “Estudo da textura”.

Assim, com a utilização do plugin Grasshopper foi possível adquirir variações únicas da textura da face, de modo a desencadear na escolha do parâmetro e do volume desejado (figura 128, 129, 130 e 131).

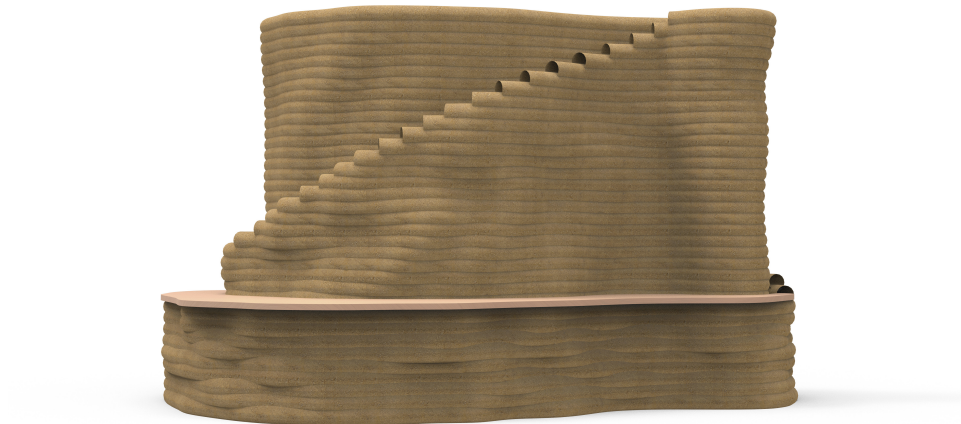


Figura 128 – Vista lateral esquerda da textura escolhida para aplicação .

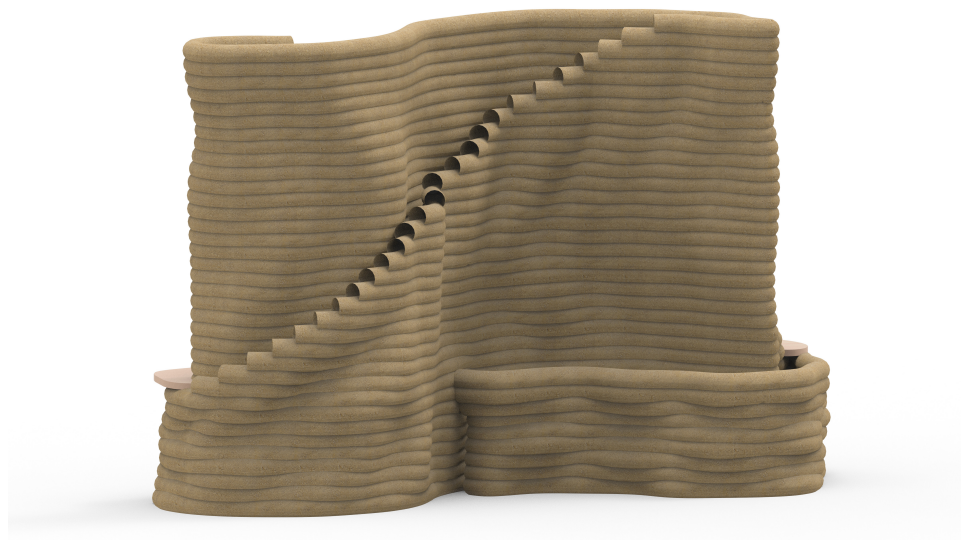


Figura 129 – Vista lateral direita da textura escolhida para aplicação .

Impressão 3D com terra crua: A ressignificação da aplicação do solo na arquitetura e no design contemporâneo





Figura 131 – Perspectiva com inserção de cenário.

Posteriormente, foram desenvolvidos os desenhos técnicos do mobiliário urbano em 2D (figura 132 e 133) (ver anexo), de modo que estes gerassem uma base comunicativa da forma, além de detalhar as dimensões do produto. Ademais, por meio do desenvolvimento dos desenhos tornou-se notável que a geometria é orgânica, e este fator potencializa a escolha do uso da impressora 3D na fabricação.

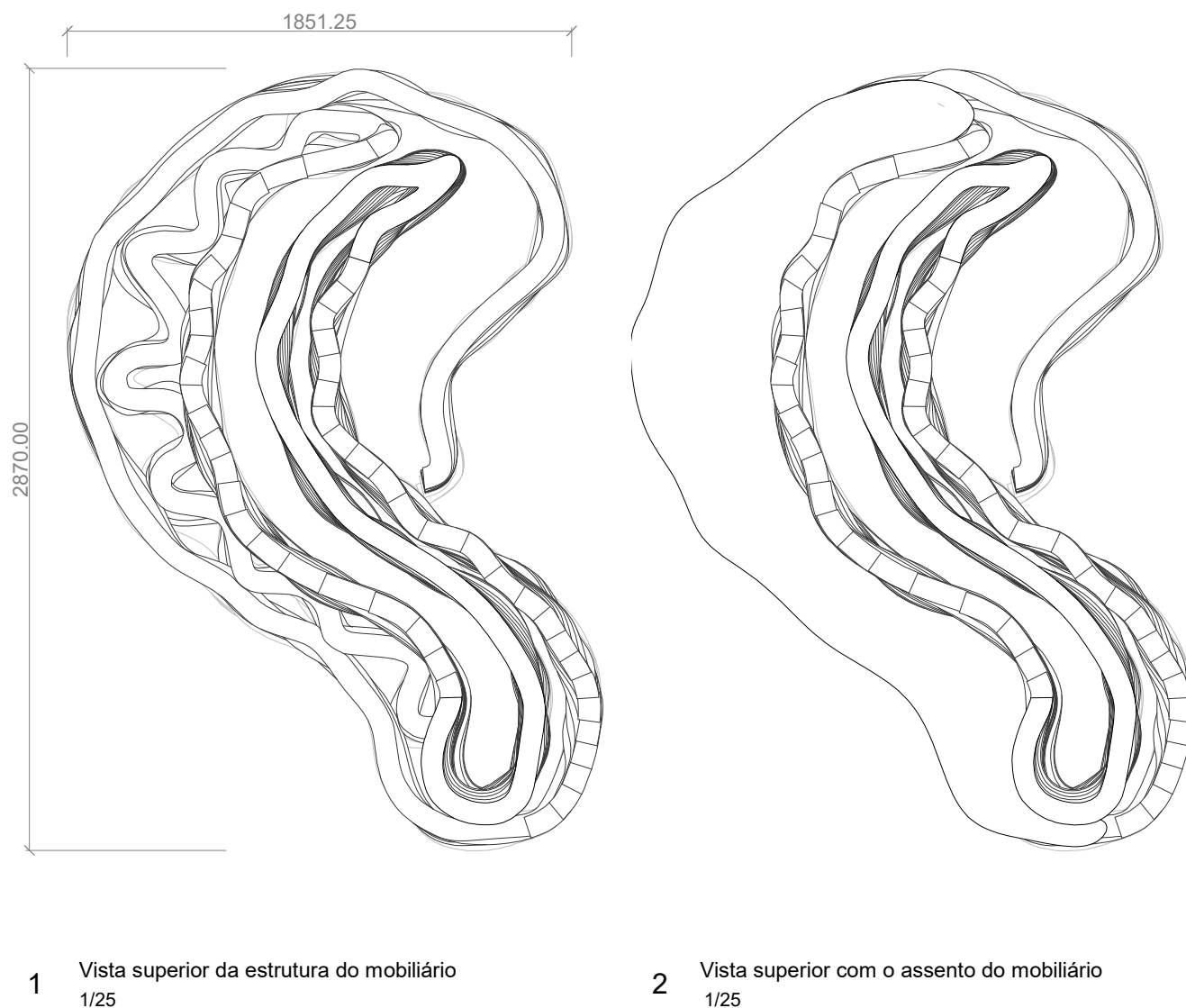
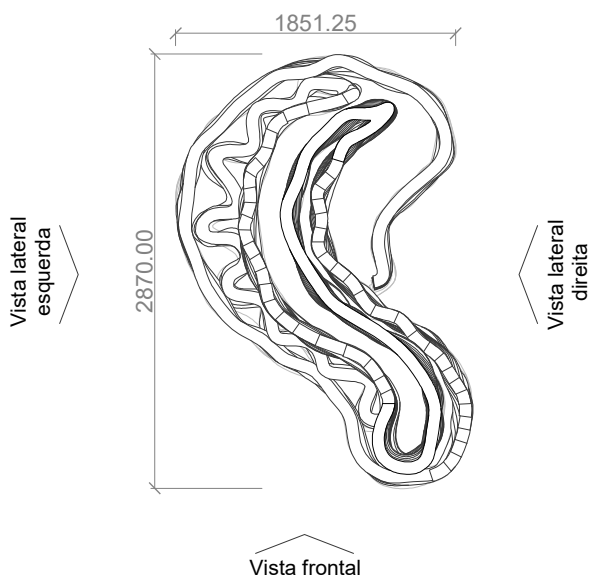
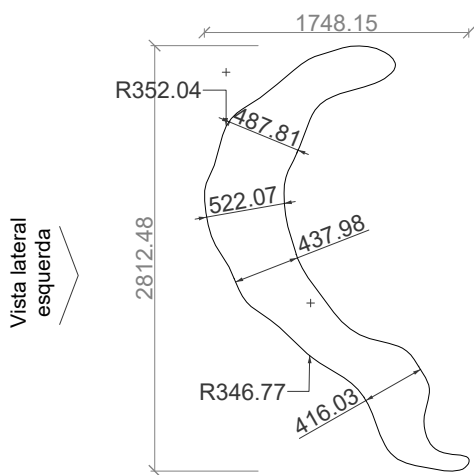


Figura 132 – Vista superior do projeto, escala 1/25.



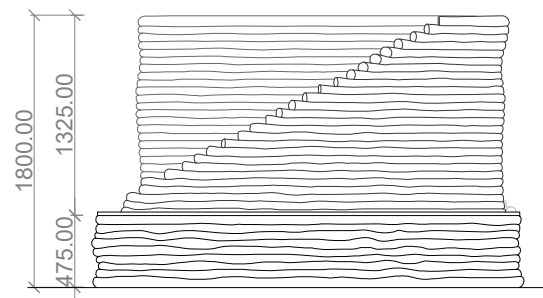
1

Vista superior da estrutura do mobiliário
1/50



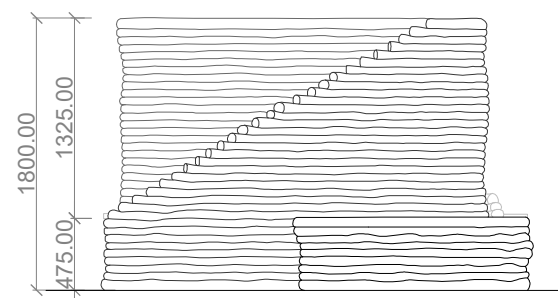
5

Vista superior do assento
1/50



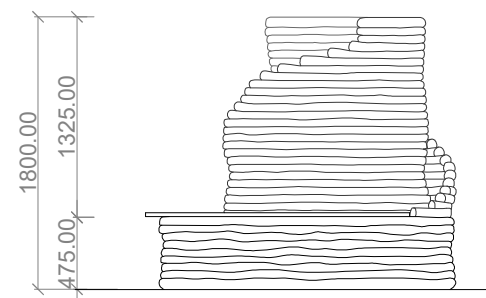
2

Vista lateral esquerda
1/50



3

Vista lateral direita
1/50



4

Vista frontal
1/50



6

Vista lateral esquerda do assento
1/50

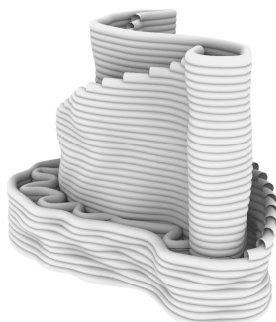
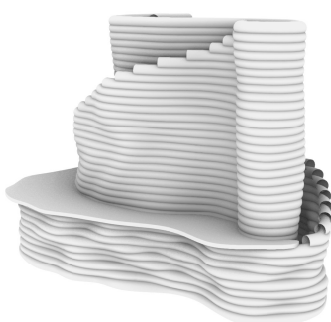


Figura 133 – Desenho técnico do projeto, com unidade de medida em mm.

3.9.4 Prototipagem (escala reduzida)

O processo de impressão da forma em escala reduzida (1/10) teve a função de validar a aplicação do material na forma projetada. Este processo tornou-se um resumo de todos os ensaios realizados anteriormente até este ponto, deste modo o processo de impressão foi semelhante ao utilizado no teste de impressão das composições. Inicialmente a primeira tentativa de extrusão falhou (figura 134), devido a um entupimento recorrente no bico da impressora, proveniente de uma grande quantidade de material no funil da mesma. Essa impressora se caracteriza por ter um parafuso que auxilia na extrusão de materiais viscosos. Além disso, sua arquitetura conta com um sistema de controle de fluxo, que permite a extrusão contínua; um reservatório para conter grandes quantidades de material; um painel de controle para ajustar os parâmetros; e uma abertura no funil que facilita o reabastecimento e limpeza. No entanto, observou-se essa dificuldade na primeira tentativa de impressão devido ao excesso de material.



Figura 134 – Primeira tentativa de impressão do mobiliário em escala reduzida.

Em seguida, com uma menor quantidade de material, foram alcançadas 36 camadas impressas no primeiro dia (figura 135). Posteriormente, no dia subsequente se imprimiu mais 28 camadas, sem afetar a qualidade da fabricação, alcançando o resultado do produto em um total de 1h e 20min (figura 136). A pausa realizada na impressão deveu-se à falta de estabilidade nas paredes, uma vez que o material apresentou um longo período de cura, resultando em deformações nas camadas inferiores com o aumento do número de filamentos sobrepostos. Assim, com a realização da pausa foi observado uma maior estabilidade na forma, que proporcionou a impressão das camadas restantes. Essa capacidade de construção pode ser comparada ao teste de extrusão manual, que com essa mistura não apresentou a melhor resposta, mas na impressão superou a sobreposição de 5 camadas contínuas.

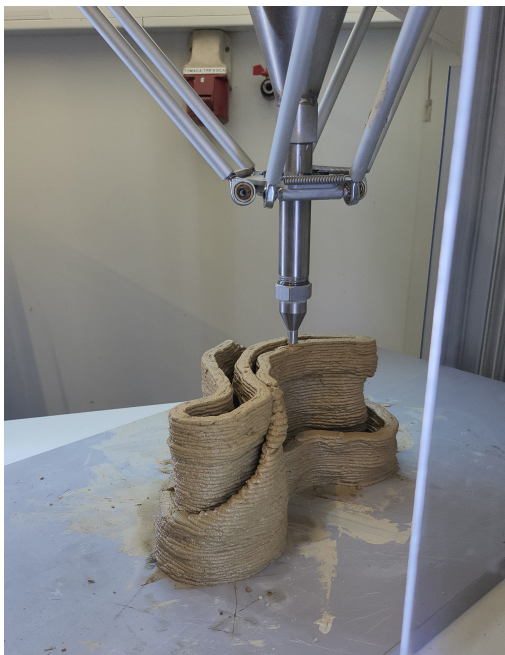


Figura 135– Primeiro dia de impressão do mobiliário em escala reduzida.



Figura 136 – Segundo dia de impressão do mobiliário em escala reduzida.

3.9.5 Produto final

O produto final resultou em um mobiliário urbano projetado em escala reduzida (1/10), com um retorno positivo para uma possível aplicação futura em escala real. Esta utilização do material alinha-se com os objetivos da dissertação, pois valida o uso da terra na impressora Delta WASP 40100 e na Smart BE MORE 3D's 2500.

Assim, junto ao material, a criação do produto visa a promoção da inovação no mercado industrial. Além disso, a disposição do elemento urbano tem como finalidade promover uma sensação de conforto e acolhimento para os pedestres (figura 137 e 138), uma vez que utiliza parâmetros ergonômicos definidos previamente e comunica-se com o entorno ao aplicar o material natural obtido do próprio lugar, a terra crua.



Figura 137 – Mobiliário urbano impresso em escala reduzida.



Figura 138 – Mobiliário urbano impresso em escala reduzida.



Figura 139 – Vista lateral do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.





Figura 141 – Vista lateral do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.





Figura 143 – Perspectiva do mobiliário urbano impresso em escala reduzida.

Impressão 3D com terra crua: A ressignificação da aplicação
do solo na arquitetura e no design contemporâneo



CAPÍTULO 4

4 CONCLUSÃO

4.1 Resposta ao problema colocado

A situação disposta na atualidade dentro do setor da construção civil é de aplicação de materiais com altas taxas de emissões de CO₂, este fator foi o impulsionador para o estudo da aplicação da terra crua dentro do setor de estudo. Desta forma, analisando as problemáticas presentes na utilização deste material, elencaram-se a vulnerabilidade à água e a associação do material a deterioração. Assim, de modo a reverter este estigma, a resposta ao problema elencado foi a busca pelo aprimoramento de uma argamassa à base de terra com aplicação na indústria 4.0.

O estudo bibliográfico fundamentou a escolha e o avanço para o melhoramento da mistura à base de terra. Este processo investigativo contou com uma vasta análise de composições, com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento de uma composição que mais se adequa a modificar o estigma presente na sociedade contemporânea para a falta de aplicabilidade da terra crua como matéria-prima para a construção. Por meio deste estudo, validou-se a aplicação da argamassa de terra na I3D de grande e pequena escala. Todavia, foi observado que a presente pesquisa é uma iniciativa à mudança do paradigma que é vivenciado na atualidade, uma vez que a mistura que apresentou maior repelência a água é uma das que apresentam grandes fissuras, além de dificuldades em ser extrudida na impressora Delta WASP 40100. E a mistura que apresenta melhor extrusão, precisa melhorar o fator de repelência à água. Assim, através desta investigação observa-se uma resposta a diminuição do uso de materiais poluentes pela construção civil, ressaltando a necessidade de se proceder com mais investigações sobre a aplicação do material estudado.

4.2 Objetivos propostos / resultados alcançados

A verificação da aplicabilidade da terra crua na manufatura aditiva, no terceiro capítulo, confirma os objetivos específicos, uma vez que foram realizados testes e ensaios para a validação do desempenho das argamassas desenvolvidas. Como resultado da melhoria das composições à base de terra, verificou-se que a inclusão de óleo de cozinha tem um impacto significativo no aumento da repelência à água adquirida pelas misturas, podendo ser um fator impulsionador no avanço do meio científico.

Para além disso, em resposta à substituição da utilização de compostos cimentícios na fabricação aditiva destinada ao setor da construção civil, a presente dissertação identificou que a composição aprimorada com cacto apresentou o melhor desempenho de extrusão, tornando-se a alternativa mais adequada para a I3D com terra crua.

4.3 Constrangimentos do processo

O desenvolvimento desta dissertação apresentou algumas limitações, como a dificuldade de obtenção da consistência adequada na mistura a ser aplicada na impressora 3D DELTA WASP 40100. Além disso, alguns materiais utilizados apresentavam uma quantidade finita disposta para o trabalho, de forma que afunilou a possibilidade de produção em grande escala do produto final.

Ademais, durante a produção do protótipo foram observados alguns constrangimentos: como a necessidade de pausar a impressão na metade do percurso para que a geometria ganhasse estabilidade, visto que a terra apresenta um longo tempo de cura; o entupimento do bico da impressora decorrente do uso da fibra sem orientação; a correlação entre a estabilização do material e a temperatura do ambiente; e a variação da precisão dimensional do filamento decorrente da consistência da mistura ao passar do tempo no funil da impressora.

4.4 Desenvolvimentos futuros

A impressão 3D com argamassa à base de terra representa uma inovação para a indústria da construção civil, uma vez que combina técnicas de produção tradicionais associadas às novas tecnologias para a promoção da sustentabilidade. Os resultados adquiridos na presente dissertação demonstram um potencial para o uso do material desenvolvido dentro de um dos setores com maior impacto ambiental, porém torna-se evidente a necessidade de se investigar o aumento da repelência à água da argamassa selecionada, de modo a garantir a sua aplicabilidade de forma segura. Ademais, o presente estudo se caracteriza como uma investigação preliminar de design de material, assim o aprimoramento do tempo de cura, a consistência da composição aplicada à fabricação aditiva, a compreensão da interação da argamassa de terra com a vegetação aplicada em um longo prazo, e o teste de usabilidade do projeto em escala real, são fundamentais para o prosseguimento deste estudo. Além disso, ensaios técnicos como de resistência à erosão e envelhecimento do material para avaliar o ciclo de vida do mesmo, faz-se de extrema necessidade para o contexto de aplicação, visto que o uso da composição pelo setor impacta diretamente o utilizador em um curto e longo prazo.

Impressão 3D com terra crua: A resignificação da aplicação do solo na arquitetura e no design contemporâneo

REFERÊNCIAS

- Abdel, H. (2022). *Sauna Sazae / Kengo Kuma & Associates*. Archdaily. <https://www.archdaily.com/995009/sauna-sazae-kengo-kuma-and-associates>
- Aectual. (2022). *3D printed circular UAE pavilion Floriade Expo 2022*. Aectual. <https://blog.aectual.com/3d-printed-circular-uae-pavilion-floriade-expo>
- AI SpaceFactory. (n.d.). *MARSHA*. AI SpaceFactory . Retrieved December 19, 2023, from <https://spacefactory.ai/marsha>
- Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. In *Automation in Construction* (Vol. 118). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>
- Alencar, M. D. (2023). *Um contributo do design para a questão dos desperdícios gerados pelo setor da Construção Civil: Reinterpretação da técnica tradicional do terrazzo em objetos de decoração*. Universidade do Porto.
- ALGARVE Portugal Tourism Guide. (2014). *ALGAR DE BENAGIL - Como Visitar a Famosa Gruta do Algarve 2024*. ALGARVEPORTUGALTOURISM. <https://www.algarveportugaltourism.com/turismo/gruta-algar-de-benagil.html>
- Alhumayani, H., Gomaa, M., Soebarto, V., & Jabi, W. (2020). Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- Alqenaee, A., & Memari, A. (2022). Experimental study of 3D printable cob mixtures. *Construction and Building Materials*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126574>
- amop synergies. (n.d.). *Banco Convexo R190-45°*. Grupoamop.
- Amran, M., Abdelgader, H. S., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Rashid, R. S. M., & Murali, G. (2022). 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: A critical review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 319). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126126>
- Aouf, R. S. (2022, September 5). *University of Virginia 3D-prints living soil walls that sprout greenery*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/09/05/university-of-virginia-3d-printed-soil-seed-walls/>
- ArchDaily. (2021, May 7). *Evolução da planta residencial: da Revolução Industrial ao período entre Guerras - Seção de um edifício parisiense, 1845, via Bibliothèque Nationale de France*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com.br/br/959529/evolucao-da-planta-residencial-da-revolucao-industrial-ao-periodo-entre-guerras>
- ASTM International. (n.d.). *C293/C293M-16. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)* (pp. 1–4). https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- Baddad, J., & Santosa, I. (2020). *The Master of Advanced Studies ETH Zurich in Architecture The Master of Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication at ETH Zürich Unveils its Latest Thesis Achievements*. <https://www.archdaily.com/952445/the-master-of-advanced-studies-in-architecture-and-digital-fabrication-at-eth-zurich-unveils-its-latest-thesis-achievements/5fc42b9e63c017f776000080-the-master-of-advanced-studies-in-architecture-and-digital-fabrication-at-eth-zurich-unveils-its-latest-thesis-achievements-photo>

- Baharal, T. (n.d.). *Connective Tissue*. Talya Baharal Paintings. Retrieved May 15, 2024, from https://talyabaharal.com/talya_baharal/connective_tissue_files/Media/Connective%20Tissue/Connective%20Tissue.jpg?disposition=download
- Barbosa, N. P. (2005, January). CONSIDERAÇÕES SOBRE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS. *UFPB*, 1–20. <https://www.researchgate.net/publication/237677765>
- Barnes, S., Kirssin, L., Needham, E., Baharlou, E., Carr, D. E., & Ma, J. (2022). 3D printing of ecologically active soil structures. *Additive Manufacturing*, 52, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102670>
- Beas, M. I. G. (1991). *Traditional Architectural Renders on Earthen Surfaces* [Graduate Program in Historic Preservation, University of Pennsylvania]. http://repository.upenn.edu/hp_theseshttp://repository.upenn.edu/hp_theses/395
- Bedarf, P. (2023, May 18). *ETH zurich recycles industrial waste for 3D-printed mineral foam construction elements*. Designboom. <https://www.designboom.com/architecture/eth-zurich-recycles-industrial-waste-3d-printed-mineral-foam-construction-elements-05-18-2023/>
- Bedarf, P., Szabo, A., Dillenburger, B., Heusi, A., Aybige, Öztüre, Reiter, L., Scocimarro, E., Zanini, M., Jeoffroy, E., Hartmann, T., Salzgeber, C., Leu, J., Petrus, L., Fleischmann, P., Lyrenmann, M., Richner, H., Seshadri, B., & Yoo, A. (n.d.). *AIRLEMENTS*. Digital Building Technologies. Retrieved December 19, 2023, from <https://dbt.arch.ethz.ch/project/airlements/>
- Bedarf, P., Szabo, A., Zanini, M., & Dillenburger, B. (2023). Robotic 3D Printing of Geopolymer Foam for Lightweight and Insulating Building Elements. *3D Printing and Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0183>
- Bellini, A. (2002). Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design [Doctor , Drexel University]. <https://researchdiscovery.drexel.edu/esploro/outputs/doctoral/Fused-deposition-of-ceramics-a-comprehensive/991014632507704721>
- Blast studio. (2020). *Lovely Trash Column*. BIO BLAST LTD. <https://www.blast-studio.com/our-projects/lovely-trash-column>
- Botha, R. (2024, May 16). *Kromdraai - Stalactite and stalagmite formations in the Wonder Cave, Kromdraai, South Africa*. Encyclopædia Britannica. <https://www.britannica.com/place/Africa>
- Brown, T. (2008). Design Thinking. *Harvard Business Review - América Latina*, 1–9.
- Building Research Establishment. (1995). Assessment of damage in low-rise buildings with particular reference to progressive foundation movement. In *BRE Digest Concise reviews of building technology, Digest 251*. <https://files.knowledgetpoint.org/uploads/14304828603790347.pdf>
- Bürdek, B. E. (2006). *Design - Geschichte, Theorie und Praxis Der Produkt - Gestaltung* (1st ed.). Edgard Bürdek.
- Buson, M. A. (2009). *Kraftterra: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical*. Universidade de Brasília.

- Buson, M., Varum, H., & Rezende, M. A. (2024). First Impressions on Three-Dimensional Printing with Earth-Based Mortar at the Faculty of Engineering of the University of Porto. *Buildings*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/buildings14020312>
- Buzio, L. (2009). *LIDYA BUZIO - CERAMICS*. Cecilia de Torres, LTD. https://www.ceciliadetorres.com/exhibitions/enlarge/lidya_buzio_-_ceramics/1137
- Camões, A., Eires, R., & Jalali, & S. (2012). Old materials and techniques to improve the durability of earth buildings. *International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). International Committee on Vernacular Architecture (CIAV)*, 1–14. https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/21621/1/Eires-Camoes-Jalali_CIAV2012_final.pdf
- Carlos & Jacinta. (n.d.). *Mobiliário urbano*. Retrieved May 31, 2024, from https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fmir-s3-cdn-cf.behance.net%2Fprojects%2F404%2F31cc4e176689459.Y3JvcCw0MDQsMzE2LDY1NywxMzE.jpg&tbid=E6-iJUUGq0de7M&vet=10CAoQxiAoAWoXChMlii-On9uuhg-MVAAAAAB0AAAAAEAc..i&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.behance.net%2Fcarlos_jacinta&docid=y6w3_Zcg7QGHcM&w=404&h=316&itg=1&q=Carlos%20Casimiro%20da%20Costa%20projeto%20mobiliario%20urbano&ved=0CAoQxiAoAWoXChMlii=-O9nuuhgMVAAAAAB0AAAAAEAc#imgsrc=18IGNey9ISpcM&imgdii=E6-iJUUGq0de7M
- Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. THABA. (1984). *Manual de construção com solo-cimento* (3rd ed.). Convênio CEPED/BNH/URBIS/CONDER/PMC/OEA/CEBRACE.
- Chiusoli, A. (2018, September 29). *The first 3D printed House with earth | Gaia*. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>
- Chiusoli, A. (2019a, March 15). *3D printed earth wall with embedded staircase*. WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-wall/>
- Chiusoli, A. (2019b, April 2). *An unprecedented art collection of 3D printed vases by WASP and Andrea Salvatori*. WASP. <https://www.3dwasp.com/en/an-unprecedented-art-collection-of-3d-printed-vases-by-wasp-and-andrea-salvatori/>
- Coimbra, J. M. (2017). Mutirão no Processo Construtivo de Casas de Barro: Vantagens e Limitações. *MIX Sustentável*, 3(4), 47–61. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2017.v3.n4.47-61>
- Constructions-3D. (2024). *WORLD RECORD la Tour*. Constructions-3D. <https://constructions-3d.com/constructions-3d/en/post/world-record-la-tour>
- Contour Crafting Corporation. (2017). *CrafTrans - CC Corp's Transformable and Rapidly Deployable Construction 3D Printer*. <https://www.contourcrafting.com/>
- Corazza, I. (2021). *Casa Impressa em 3D com Tecnologia TECLA / Mario Cucinella Architects Guardar*. Archdaily.
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. In *Automation in Construction* (Vol. 103, pp. 251–267). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- D-Shape. (2024). *Enrico Dini – Pioneering 3D Construction Printing*. D-Shape - The Inventor. <https://d-shape.com/enrico-dini/>

- Eires, R., Camões, A., & Jalali, S. (2017). Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3281–3292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.141>
- Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). *O que é a economia circular*. Ellen MacArthur Foundation. Retrieved December 30, 2023, from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/visao-geral>
- Ellrichshausen, P. Von. (2017, May 17). *Pezo Von Ellrichshausen - Vara Pavilion*. HICarquitectura. <https://hicarquitectura.com/2017/05/pezo-von-ellrichshausen-vara-pavilion/>
- Emerging Objects. (2019). *Mud Frontiers: Part II*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/project/mud-frontiers-part-ii/>
- Emerging Objects. (2020). *Casa Covida*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/project/casa-covida/>
- Emerging Objects. (2022a). *Co-Botic Vessels*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/project/co-botic-vessels/>
- Emerging Objects. (2022b). *Future Archeologies*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/project/future-archeologies/>
- Emerging Objects. (2023). *About*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/about/>
- Escrivanes, A. D. C. (2019). *Kê ni São Tomé cu Plinspe Na Procura de Novos Modos de Construir* [Mestrado, Universidade do Porto]. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/126660>
- Etherington, R. (2011, June 28). *The Solar Sinter by Markus Kayser*. Dezeen.
- Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
- Fernandes, M. (n.d.). TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO EM TERRA. *10ª Mesa Redonda de Primavera TERRA: FORMA DE CONSTRUIR ARQUITECTURA . ANTROPOLOGIA . ARQUEOLOGIA*, 20–24. Retrieved August 5, 2024, from <https://www.aldeia.org/portal/user/documentos/mcorreia.pdf>
- Ferrari, V. J., Souza, Á., Baltazar, H., Dotto, W., & Neto, J. (2014, September). Tijolos vazados de solo-cimento produzidos com solo da Região do Arenito Caiuá do Paraná. *Associação Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído*, 131–148. <https://www.scielo.br/j/ac/a/hb9SSdWTV4ZGbJJ7krvh9XJ/?format=pdf&lang=pt>
- Ferretti, E., Moretti, M., Chiusoli, A., Naldoni, L., Fabritiis, F., & Visonà, M. (2022). Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. *Materials*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15030743>
- Franco, J. (2014, January 13). *Arquitetura vernacular: casas Musgum, nos Camarões*. ArchDaily Brasil. <https://www.archdaily.com.br/br/01-167330/arquitetura-vernacular-casas-musgum-nos-camaroes>
- Franke, L. N. (2017). *Arquitetura Contemporânea em Terra: modos de ver e de fazer*. Universidade do Porto.
- Fratello, R. S. (2016). *GCODE.Clay*. Emerging Objects. <https://emergingobjects.com/project/gcode-clay/>

- Frearson, A. (2012). *Havøysund Tourist Route by Reiulf Ramstad Architects*. <https://www.dezeen.com/2012/06/29/havøysund-tourist-route-by-reiulf-ramstad-architects/>
- Freire, M. E. F. (1999). Habitação, sinónimo de qualidade de vida e de conforto humano... In *Universidades Lusíada* (pp. 23–28). <http://repositorio.ulusiada.pt>
- Freitas, R., Coutinho, S., & Waechter, H. (2013). Análise de Metodologias em Design: a informação tratada por diferentes olhares. *Estudos Em Design*, 1–15.
- García-Vera, V. E., Tenza-Abril, A. J., Solak, A. M., & Lanzón, M. (2020). Calcium hydroxide nanoparticles coatings applied on cultural heritage materials: Their influence on physical characteristics of earthen plasters. *Applied Surface Science*, 504. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144195>
- Giménez, A. (n.d.). *ARCHITECTURE: GAUDISM.AI*. Musée Vanguard of Photography Culture. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.instagram.com/gaudism.ai/?hl=en>
- Giménez, A. (2023, July 16). *Finding comfort between rocks*. Instagram - Gaudism.Ai. https://www.instagram.com/p/CuxQopNLwwF/?img_index=1
- Gomaa, M., Carfrae, J., Goodhew, S., Jabi, W., & Veliz Reyes, A. (2019). Thermal performance exploration of 3D printed cob. *Architectural Science Review*, 62(3), 230–237. <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1606776>
- Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 338). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials and Design*, 100, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- Gressler, S. C. (2007). Habitação e design. Um estudo comparativo entre residências em Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil, e Columbia, Missouri, E.U.A. *Revista de Pesquisa Em Arquitetura e Urbanismo Programa de Pós-Graduação Do Departamento de Arquitetura e Urbanismo Eesc-Usp*, 63–79.
- Grutas de Mira de Aire. (2024). *Enquadramento Geológico e Geomorfológico*. Grutas de Mira de Aire. <https://www.grutasmiradaire.com/grutas#-gallery-10>
- Gutiérrez, R. M. de, Robayo-Salazar, R., Villaquirán-Caicedo, M. A., & Arjona, S. D. (2023, February 1). 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, 146, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- Hahn, J. (2022, January 18). *Blast Studio 3D prints column from mycelium to make "architecture that could feed people."* Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/01/18/blast-studio-tree-column-mycelium-design/>
- Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., & Morel, J. C. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. In *Building and Environment* (Vol. 106, pp. 103–119). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Hambach, M., & Volkmer, D. (2017). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 79, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>

- Harrouk, C. (2021). *Local Collective desenha bancos feitos de argila para o metrô de Londres*. https://www.archdaily.com.br/br/957504/local-collective-desenha-bancos-feitos-de-argila-para-o-metro-de-londres?ad_campaign=normal-tag
- IAAC. (n.d.). *Digital Adobe - IAAC*. IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia. Retrieved May 15, 2024, from <https://iaac.net/project/digital-adobe/>
- Institute for advanced architecture of Catalonia. (2016, October 24). *OTF Week 2-4 [Workshop Details]*. Institute for Advanced Architecture of Catalonia - Educational Programmes. <https://www.iaacblog.com/projects/otf-week-2-4-workshop-details/>
- Institute for advanced architecture of Catalonia. (2017, March 29). *TerraPerforma - Open Thesis Fabrication 2016/17*. Institute for Advanced Architecture of Catalonia - Educational Programmes. <https://www.iaacblog.com/projects/otf-week-2-4-workshop-details/>
- Institute for advanced architecture of Catalonia. (2020, March 24). *OPENINGS IN 3D PRINTING WITH EARTH*. Institute for Advanced Architecture of Catalonia - Educational Programmes. <https://www.iaacblog.com/programs/openings-3d-printing-earth/>
- International Organization for Standardization. (2002). *ISO 15148*.
- IOUS Studio. (2022). *Planter Vases*. IOUS Studio. <https://www.ious-studio.com/design/plantervases>
- IOUS Studio. (2023). *3D-Printed Exterior Wall*. IOUS Studio. <https://www.ious-studio.com/architecture/bioreceptive-wall>
- Jain, G., Gupta, V., & Pandey, M. (2016). Case Study of Construction Pollution Impact on Environment. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*, 4(6). www.ijeter.everscience.org
- John Morgan Thomas Arquitetos paisagistas, ZFA Engenheiros estruturais S&M Iluminação paisagística, Lambert Lighting, & JH Williams Enterprises Inc. (2018). *The Golden Spiral*. WOWHAUS Art and Design. <https://www.thewowhaus.com/portfolio/the-golden-spiral/>
- Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., & Laan, A. Z. Van Der. (2015). Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. *International Journal of Design*, 9(2), 35–54. www.ijdesign.org
- Kayser, M., & Royal College of Art. (2011). *Solar Sinter*. KAYSER WORKS. <https://kayserworks.com/#/798817030644/>
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Lisbôa, S. (2019). *Painel de pau a pique - bambu e terra - na Ilha de Santa Catarina*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Listek, V. (2022, April 15). *Milk Cartons Get Second Life as 3D Printed Bench in Tuscany*. 3dprint.Com. <https://3dprint.com/290386/tuscan-town-installs-3d-printed-bench-made-from-discarded-milk-cartons/>
- Lopes, G. T. F. (2016). *Exploração das possibilidades da impressão 3D na construção* [Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 –, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>

- Ma, G., Li, Z., & Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 162, 613–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- Ma, G., Salman, N. M., Wang, L., & Wang, F. (2020). A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118305>
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N. El, & Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 6(6), 14–22. https://www.researchgate.net/publication/280488795_3D_Concrete_Printing_Machine_and_Mix_Design
- Manual de Iluminação Pública - Revisão (October 2016). <https://www.e-redes.pt/sites/eredes/files/2019-04/Manual%20Iluminacao%20Publica.pdf>
- Manzini, E. (2008). *Design para a inovação social e sustentabilidade | Comunidades criativas, organizações colaborativas e novas redes projetuais* (C. Cipolla, E. Spampinato, & A. L. Silva, Eds.). E-papers. https://instrumentos-projetuais.files.wordpress.com/2019/02/design-para-inovacca7acc83o-e-sustentabilidade_manzini.pdf
- Maropeng and Sterkfontein Caves. (2024a). *Explore the caves*. Cradle of Humankind World Heritage Site. <https://www.maropeng.co.za/content/page/explore-the-caves>
- Maropeng and Sterkfontein Caves. (2024b). *Swartkrans Walking Tour in photos*. Cradle of Humankind World Heritage Site. <https://www.maropeng.co.za/news/entry/swartkrans-walking-tour-in-photos>
- Martinez, V. (2017). *BENCHES: S. LAB23 Supreme Urban Living*. https://www.lab23.it/en/product/street-furniture-benches-s/?lang=en&wpp_export=pdf&print-products=pdf
- Mendes, M. (2006). *Curso de Construção com Terra e de Formação de Formadores, desenvolvido em Mumemo, distrito de Marracuene, província de Maputo, Moçambique*. Mumemo. https://mumemo.blogspot.com/2006_07_16_archive.html
- Métodos de Ensaio de Cimentos: NP EN 196-1: 2006. Parte 1. Determinação Das Resistências Mecânicas / Instituto Português Da Qualidade, 1 (2006). https://catalogo.up.pt:443/F/?func=direct&doc_number=000487209&local_base=UPB01
- microcubo. (n.d.). *Banco Bloco Parque*. Microcubo. Retrieved June 24, 2024, from <https://microcubo.pt/mobiliario-urbano/bancos-de-jardim/banco-bloco-parque/>
- Ministério dos direitos humanos e da cidadania - Governo Federal Brasil. (2023). *POPULAÇÃO EM SITUAÇÃO DE RUA - Diagnóstico com base nos dados e informações disponíveis em registros administrativos e sistemas do Governo Federal*. www.gov.br/mdh/pt-br
- Minke, G. (2006). *Building with Earth Appendices - Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 6 Birkhäuser – Publishers for Architecture.
- miramondo. (n.d.). *Buddy*. Miramondo Public Design GmbH. Retrieved June 24, 2024, from https://www.miramondo.com/products/buddy/docs/Buddy_Dimensions_Mounting_EN.pdf?v=1719342865676

- MOLO. (n.d.). *about molo*. Molodesign. Retrieved May 31, 2024, from <https://molodesign.com/about-molo/>
- Montani, C. (2020). XXXI Rapporto marmo e pietre nel mondo 2020. In D. Canali (Ed.), *Aldus Casa di Edizioni in Carrara: Congiuntura internazionale Produzione · Scambi · Consumi Tecnologie · Beni strumentali Previsioni di sviluppo Schede dei Paesi leader* (pp. 1–151). <http://www.abirochas.com.br>
- Moretti, F. (2016, September 1). *WASP apre nuove strade alla ceramica del futuro*. WASP. <https://www.3dwasp.com/wasp-apre-nuove-strade-alla-ceramica-del-futuro/>
- Mueller, R. P., Prater, T. J., Roman, M., Edmunson, J. E., Fiske, M. R., & Carra-to, P. (2019, October). Nasa Centennial Challenge: Three dimensional (3D) printed habitat, PHASE 3. *70th International Astronautical Congress (IAC)*, 1–13. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190032475/downloads/20190032475.pdf>
- MYCO-CLAY. (2024, February 8). *BIOMATTERS 3D PRINT MYCELIUM AND CLAY AS INTERIOR OBJECTS* -. Designboom.
- Neto, R., & Soares, R. (2020). Introdução ao Fabrico Aditivo. In [PowerPoint slides] . MODELAÇÃO COMPUTACIONAL E PROTOTIPAGEM-1ª Aula. https://sigarra.up.pt/fbaup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=1008835&pct_parametros=pv_ocorrencia_id=478670&pct_grupo=4053
- Neufert, E. (1998). *Arte de projetar em arquitetura* (Editorial Gustavo Gili, Ed.; 21st ed.).
- Olender, M. (2006). *A técnica do Pau-a-pique: subsídios para a sua preservação*. Universidade Federal da Bahia.
- Oliveira, D., Silva, R., Schueremans, L., & Lourenço, P. (2010). A construção em taipa e engenharia sísmica. *8º CONGRESSO DE SISMOLOGIA E ENGENHARIA SÍSMICA*, 1–13.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012, April). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Padla, R. (2022, March 31). *House Zero 3D-Printed Home proves to be an architectural innovation*. Yanko Design.
- Panda, B., Noor Mohamed, N., Tay, Y., & Tan, M. (2018). Bond Strength in 3D Printed Geopolymer Mortar. In *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018* (RILEM Bookseries, Vol. 19, pp. 200–206). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_18
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. In *Automation in Construction* (Vol. 5).
- Pêgo, P. A., Rangel, B., & Matos, A. (2023). *Impressão 3D de um Produto a Partir de Resíduos de Mármore* [Mestrado]. Universidade do Porto.
- Pereira, P., & Oliveira, M. (2023). *Upper*. Larus. <https://www.larus.pt/pt/produto/download/296>
- Perrot, A., Rangeard, D., & Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>
- Pinheiro, L., Rangel, B., Guimarães, A., & Silva, A. (2016). Panorama da produção de obras em terra crua com design contemporâneo nos últimos 60 anos no Brasil. *2 Congresso Internacional de História Da Construção Luso-Brasileira*, 1–11.

- Pintos, P. (2022, June 26). *Casa Covida / Emerging Objects*. Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/963978/casa-covida-emerging-objects>
- Pires, A. M. C. (2013). *Análise de Paredes de Tabique e de Medidas de Reforço Estrutural; Estudo numérico* [Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- Pisani, M. A. J. (2004). TAIPAS: A ARQUITETURA DE TERRA. *Sinergia, São Paulo*, 5(1), 9–15. <https://www.researchgate.net/publication/271829655>
- Prieto, C. (2022, July 21). *3D Printed Masonry Wall: The Introduction of Digital Craftsmanship*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/985574/3d-printed-masonry-wall-the-introduction-of-digital-craftsmanship>
- Prince, J. D. (2014). 3D Printing: An Industrial Revolution. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 11(1), 39–45. <https://doi.org/10.1080/15424065.2014.877247>
- Qu, Z., Guo, S., Zheng, Y., Giakoumatos, E. C., Yu, Q., & Voets, I. K. (2021). A simple method to create hydrophobic mortar using bacteria grown in liquid cultures. *Construction and Building Materials*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123744>
- Quagliarini, E., Stazi, A., Pasqualini, E., & Fratalocchi, E. (2010). Cob construction in Italy: Some lessons from the past. *Sustainability*, 2(10), 3291–3308. <https://doi.org/10.3390/su2103291>
- Rejeski, D., Zhao, F., & Huang, Y. (2018). Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. In *Additive Manufacturing* (Vol. 19, pp. 21–28). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>
- Ribeiro, E. R. (2023). *Impressão 3D com Pó de Mármore: Design como veículo para a valorização de resíduos*. Universidade do Porto.
- Richard Serra. (2020). *Transmitter*. Thomas Lannes. <https://gagosian.com/exhibitions/2021/richard-serra-transmitter/>
- Rocha, R. R. da, Barros, G. H. V., Silva, R. J. da, & Simões, R. D. (2021). Resistência mecânica de tijolos adobe reforçados com resíduos de casca de ovo. *COLLOQUIUM EXACTARUM*, 13(1), 30–37. <https://doi.org/10.5747/ce.2021.v13.n1.e347>
- Rodrigues, R., Brito, J., & Sardinha, M. (2015, February 15). Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*, 77, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.104>
- Rushing, T. S., Stynoski, P. B., Barna, L. A., Al-Chaar, G. K., Burroughs, J. F., Shannon, J. D., Kreiger, M. A., & Case, M. P. (2019). Investigation of Concrete Mixtures for Additive Construction. In *3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications* (pp. 137–160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00007-5>
- Rute, E., Aires, C., & Said, J. (2014). Materiais e técnicas antigas para melhorar a durabilidade dos edifícios em terra. *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, 1–10.
- Salvatori, A. (2011). *IKEBANA ROCK’N’ROLL*. <https://salvatoriandrea.it/index.php/events/13-naiv-vain>
- Santana, L. (2015). *AValiação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina]. <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160786/336485.pdf?sequence=1>

- Santiago, C. C. (2001). *O solo como material de construção* (2nd ed.). EDUFBA.
- Sarabia, E. (2021). *Desert X 2021*. Ignant. <https://www.ignant.com/2021/05/11/at-desert-x-2021-thought-provoking-art-voices-the-disempowered/>
- Severi, A. (2022, December 20). *TOVA é o primeiro edifício impresso em 3D da Espanha com Crane WASP*. <https://www.3dwasp.com/en/tova-3d-printed-building-with-crane-wasp/>
- Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., & Malek, S. (2019, January 23). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3d printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>
- Sher, D. (2021, November 13). *AICT brings its construction 3D printing technology to the US*. Voxelmatters. <https://www.voxelmatters.com/aict-brings-its-construction-3d-printing-technology-to-the-us/>
- Sicari, A. A., & Zanella, A. V. (2018). Pessoas em Situação de Rua no Brasil: Revisão Sistemática. *Psicologia: Ciência e Profissão*, 38(4), 662–679. <https://doi.org/10.1590/1982-3703003292017>
- Silva, G., Ñáñez, R., Zavaleta, D., Burgos, V., Kim, S., Ruiz, G., Pando, M. A., Aguilar, R., & Nakamatsu, J. (2022). Eco-friendly additive construction: Analysis of the printability of earthen-based matrices stabilized with potato starch gel and sisal fibers. *Construction and Building Materials*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128556>
- Silva, S. (2005). *Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- STODIS. (n.d.). *Banco Urbano BASO*. STODIS. <https://www.stodis.pt/produto/banco-urbano-baso/>
- Stouhi, D. (2019). *Design Installation Transports Visitors to Historic Jordanian Site*. Archdaily. <https://www.archdaily.com/929344/design-installation-transports-visitors-to-historic-jordanian-site/5de0dc6a3312fdf5e60001ca-design-installation-transports-visitors-to-historic-jordanian-site-photo>
- Studio RAP. (2019). *New Delft Blue*. Studio RAP. <https://studiorap.nl/New-Delft-Blue>
- Studio RAP. (2022). *Ceramic House*. Studio RAP. <https://studiorap.nl/Ceramic-House>
- Taparello, G. (2016, September 13). A industrialização da construção com terra através da impressão 3D. V. 2 n. 2 (2016): *Mix Sustentável (Edição Regular)*, 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2016.v2.n2.87-92>
- Tay, Y. W., Panda, B., Paul, S. C., Tan, M. J., Qian, S. Z., Leong, K. F., & Chua, C. K. (2016). Processing and properties of construction materials for 3D printing. *Materials Science Forum*, 861, 177–181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.861.177>
- Teixeira, J. (2018). *Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios*. Universidade do Porto.
- Teixeira, J., Schaefer, C. O., Rangel, B., Maia, L., & Alves, J. L. (2023a). A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art. *Frontiers of Architectural Research*, 12(2), 337–360. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.10.001>

- Teixeira, J., Schaefer, C. O., Rangel, B., Maia, L., & Alves, J. L. (2023b). A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction e The state of art. In *Frontiers of Architectural Research* (Vol. 12, Issue 2, pp. 337–360). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.10.001>
- The University of Waterloo. (2022, June 20). *Student and faculty project “Hive” now on display*. The University of Waterloo. <https://uwaterloo.ca/architecture/news/student-and-faculty-project-hive-now-display>
- Thormark, C. (2001). Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 33). www.elsevier.com/locate/resconrec
- Tom Ferguson Photography, & Crook, L. (2019, April 18). *Cave-like gift shops created by Koichi Takada Architects inside National Museum of Qatar National Museum of Qatar*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2019/04/18/koichi-takada-national-museum-qatar-interior/>
- Torgal, F. P., Eires, R., & Jalali, S. (2009). *Construção em Terra* (TecMinho). Universidade do Minho.
- Turner, B. (2009a). *Radiolaria pavilion by Shiro Studio*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio/>
- Turner, B. (2009b, June 22). *Radiolaria pavilion by Shiro Studio*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio/>
- UNESCO. (1999). *Fossil Hominid Sites of Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai, and Environs*.
- UNESCO Office in Brasília, Brazil. M. of E. F. U. of S. C. (Brazil). (2010). *História geral da Africa, I: metodologia e pré-história da Africa* (J. Ki -Zerbo, Ed.; Vol. 2). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000190249>
- UNFOLD. (2009, December 12). *Ceramic 3d Printing*. Unfold. <https://unfold.be/pages/ceramic-3d-printing>
- United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global status report for buildings and construction*. www.globalabc.org
- Van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials*, 28(1), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
- Vital, A., Silva, A., Oliveira, D., Cavalcante, F., & Araújo, J. (2017). *Capítulo 13 - TESTES INICIAIS COM SEIVA DE PALMA (Opuntia ficus-indica (L.) Mill.) E RESINA DE ESPONJINHA [Albizia lebbbeck (L.) Benth.] NA ELABORAÇÃO DA TINTA DE TERRA*. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/33464/TESTES%20INICIAIS%20COM%20SEIVA%20DE%20PALMA%20-%20CAP%20DE%20LIVRO%20CDSA%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Walker, K. (2022, July 21). *UVA Researchers 3D-print Soil Structures that Can Grow Plants*. University of Virginia School of Architecture. <https://www.arch.virginia.edu/news/uva-researchers-3d-print-soil-structures-that-can-grow-plants>
- Walsh, N. P. (2019, May 13). *AI SpaceFactory Wins NASA’s 3D-Printed Mars Habitat Challenge*. Archdaily. <https://www.archdaily.com/916888/ai-spacefactory-wins-nasas-3d-printed-mars-habitat-challenge>
- WASP. (n.d.). *Our History*. WASP. Retrieved December 28, 2023, from <https://www.3dwasp.com/en/about-us/>
- WASP. (2023, October). *WASP40100 LDM - TECHNICAL DETAILS*. WASP. <https://www.3dwasp.com/wp-content/uploads/2024/01/WASP-40100-LDM-Technical-Sheet.pdf>

- WASP, & Mario Cucinella Architects. (2021, January 21). *TECLA*. WASP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>
- Wieser, A. A., Scherz, M., Passer, A., & Kreiner, H. (2021). Challenges of a healthy built environment: Air pollution in construction industry. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 18, pp. 1–29). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su131810469>
- Winston, A. (2019). Print Your City turns recycled food containers into street furniture. <https://www.dezeen.com/2019/02/13/print-your-city-recycled-plastic-street-furniture/>
- Wohlers, T. (2023). History of additive manufacturing.
- Yameng, J., Philippe, P., & Nordine, L. (2023). The selection and design of earthen materials for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 404, 133114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133114>
- Yu, S., Sanjayan, J., & Du, H. (2022). Effects of cement mortar characteristics on aggregate-bed 3D concrete printing. *Additive Manufacturing*, 58, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103024>
- ZANO Mobiliario Urbano. (n.d.). Banco Domino 02.440. ZANO. Retrieved June 24, 2024, from <https://www.zano.es/mobiliario-urbano/catalogo/bancas/banco-domino-02-440>
- Zhuang, J. (2015). Olivier van Herpt. Olivier van Herpt. <https://oliviervanherpt.com/about/>

ANEXOS

Mistura 1.0

500g de terra

125g de água

- 1 **Capacidade de extrusão:** Difícil extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição apresentou uma boa aderência entre camadas, e foi capaz de se estabelecer em até 5 camadas. Entretanto, por conta da difícil extrusão os filamentos apresentaram uma quebra na linearidade.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** No ensaio de estabilidade do cilindro foi realizado o ensaio com duas cargas de peso distintos, a primeira constituída por uma peça com 176g e outra com 114g. Posteriormente foi inserido mais dois pesos, o primeiro com 456g e o segundo com 433g. Através desta análise foi possível compreender a capacidade de estabilização da mistura ao sofrer compressão por um peso, na primeira parte do ensaio esta amostra teve um abaixamento de 0,5cm e na segunda de 0,4cm. Assim, esta composição demonstra uma boa retenção da forma e baixa variabilidade em estado “verde”.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9.5cm
 - o Dia 14- 9.5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Uma composição com pouca variação estética, apresentando cor de terra e textura lisa.



Mistura 1.0

Mistura 2.0

469g de terra

125g de água

31g de cal hidráulica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Difícil extrusão manual, apresentou quebra da continuidade do filamento. Com isso, foi identificado que a aplicação desta mistura é inviável na impressão 3D.
- 2 **Capacidade de construção:** Não apresentou capacidade de ser extrudida manualmente (saco de confeiteiro). Assim, observou-se que com o acréscimo da cal hidráulica e pouca água, inviabilizou o uso desta mistura.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Não apresentou variações com a inserção das duas primeiras peças. Ao acrescentar as outras duas peças com 456g e 433g, a peça variou 0,4cm, resultando em uma pequena retração em comparação com as demais misturas. De forma a demonstrar que a composição possui baixa fluidez e trabalhabilidade, aspectos estes que são essenciais para a fabricação aditiva.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9.5cm, se repartiu em 3 pedaços
 - o Dia 14- 9.5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Uma composição com pouca variação estética, apresentando cor mais clara do que a anterior, por conta da inserção da cal. Sua textura permaneceu lisa.



Mistura 2.0

Mistura 2.1



Mistura 2.1

467g de terra
167g de água
33g de cal hidráulica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresenta uma melhor trabalhabilidade, e capacidade de extrusão no bico de 18mm do saco de confeitiro, mas não é adequada para a impressão na WASP 40100.
- 2 **Capacidade de construção:** Decorrente da maior fluidez, a mistura apresentou uma menor capacidade de construção, alcançando apenas 3 camadas. De modo que não estabilizou o próprio peso.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Nesta amostra a composição sofreu variação assim que saiu do molde, de modo a apresentar um abaixamento de 0,5cm. Em seguida, com o primeiro peso de 176g a composição abaixou mais 0,5cm. Ao inserir o segundo peso de 114g, a amostra diminuiu um total de 1,2cm. Demonstrando assim que a amostra apresenta mais fluidez em comparação com as anteriores.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,7cm
 - o Dia 28- 9,7cm
- 5 **Estético:** Uma composição com pouca variação estética, semelhante com a anterior.

Mistura 2.2



Mistura 2.2

447g de terra
167g de água
53g de cal hidráulica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta Mistura apresentou a mesma capacidade de extrusão manual que a anterior.
- 2 **Capacidade de construção:** Nesta Mistura foi possível observar que a composição apresenta um potencial de construção, conseguindo alcançar 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Não apresentou abaixamento com a inserção dos dois primeiros pesos. Ao acrescentar os pesos 456g e 433g, a amostra variou inicialmente com 0,5cm e posteriormente em 1,5cm. Por meio de uma análise deste ensaio, percebe-se que esta mistura ainda necessita de melhorias, visto que se desestabilizou de forma abrupta com a inserção do último peso. De forma que se crie a hipótese que esta mistura pode colapsar caso seja utilizada para as próximas etapas com a extrusão em uma impressora 3D.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 9,5 cm

Estético: Uma composição que apresentou pouca variação em relação à anterior, com tonalidades semelhantes e sem variação de textura.

Mistura 2.3

433g de terra
167g de água
67g de cal hidráulica

- 1 **Capacidade de extrusão:** A mistura se apresentou de forma semelhante que a anterior, não sendo adequada para extrusão na impressora de destino.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta composição apresentou uma alta capacidade de construção, de modo a alcançar 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** De modo a melhorar a resistência mecânica, esta mistura apresentou o acréscimo de cal, visando estabilizar a mistura ao receber carga. Assim, a composição variou em 0,5cm com a inserção dos dois primeiros pesos. Ao acrescentar as demais cargas, a amostra retraiu inicialmente em mais 0,2cm e posteriormente 0,8cm. Assim, esta mistura apresentou um melhor comportamento em relação a estabilidade.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5 cm
- 5 **Estético:** Uma composição que apresentou pouca variação em relação à anterior, com tonalidades semelhantes e sem variação de textura.



Mistura 2.3

Mistura 2.4

400g de terra
167g de água
100g de cal hidráulica

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição necessitou de um pouco mais de esforço do que a anterior para sua extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Obteve uma alta capacidade de construção, de modo a alcançar 6 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Assim como a anterior, esta composição apresentou o acréscimo de cal, com a finalidade de aumentar a sua resistência. Esta mistura não apresentou variações com a inserção das duas primeiras cargas, constituídas por 176g e 114g. Todavia, com a inserção do peso de 456g, a amostra se desestabilizou em 0,3cm e posteriormente, com a segunda carga de 433g, a amostra cedeu em uma altura de mais 0,6cm. Assim, esta mistura teve uma queda gradativa e apresentou o melhor comportamento de estabilidade em relação às anteriores.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 10 cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 2.4

Mistura 3.0



367g de terra
167g de água
100g de cal hidráulica
33g de areia

- 1 Capacidade de extrusão:** A mistura apresentou uma boa trabalhabilidade e capacidade de extrusão.
- 2 Capacidade de construção:** Esta composição apresentou uma capacidade de alcançar 5 camadas sobrepostas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** O ensaio de estabilidade contou com a inserção inicial da carga de 176g, com este peso a amostra não sofreu variações. Em seguida, com a inclusão da segunda carga de 114g, o modelo retraiu em 0,4cm da sua altura inicial. Posteriormente com a inserção dos dois pesos subsequentes, a amostra variou respectivamente mais 0,2cm e em seguida mais 0,9cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 10cm
 - Dia 14- 10cm
 - Dia 28- 9,8 cm
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 3.0

Mistura 3.1



333g de terra
167g de água
100g de cal hidráulica
67g de areia

- 1 Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresenta capacidade de extrusão manual com uso do bico de 18mm do saco de confeitiro.
- 2 Capacidade de construção:** A composição apresenta uma capacidade de construção de 4 camadas, mas em comparação a composição anterior esta mistura adquiriu uma melhor trabalhabilidade.
- 3 Estabilidade do cilindro:** Esta mistura ao sair do molde retraiu 0,2cm, em seguida com a sobreposição da carga de 176g, a amostra retraiu mais 0,2cm, já com a inserção da carga de 114g, o modelo diminuiu mais 1,5cm. Posteriormente, com a inclusão da carga de 456g, o modelo passou a ter uma diminuição da sua dimensão em 0,4cm e por fim com a carga de 433g, retraiu mais 0,5cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 10cm
 - Dia 14- 10cm
 - Dia 28- 10 cm
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 3.1

Mistura 3.2

300g de terra
167g de água
100g de cal hidráulica
100g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição se apresentou com mais trabalhabilidade por conta do acréscimo da areia, consequentemente obteve uma melhor extrusão.
- 2 **Capacidade de construção:** Todavia, esta mistura apenas conseguiu suportar a carga de 3 camadas sobrepostas, demonstrando que a substituição da terra crua pela areia afeta a capacidade de construção.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Neste ensaio foi observado que a mistura ao sair do molde retraiu 0,3cm, posteriormente com a inserção dos pesos de 176g e 114g, a mistura rebaixou consecutivamente em mais 0,8cm e 0,7cm. Ademais, com a inserção da carga de 456g e 433g, a mistura retraiu mais 0,4cm e 0,7cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 3.2

Mistura 3.3

267g de terra
167g de água
100g de cal hidráulica
133g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** A mistura apresenta a capacidade de extrusão, entretanto com pouca consistência.
- 2 **Capacidade de construção:** Apresentou a capacidade de sobrepor apenas duas camadas de mistura.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** No ensaio de estabilidade do cilindro foi compreendido que quanto maior a fluidez do material, menor é a capacidade de suportar cargas. Desta forma, a mistura retraiu ao sair do molde em 0,2cm, em seguida com a inserção das cargas de 176g e 114g, a amostra diminuiu em 0,6cm e mais 0,7cm. Posteriormente, ao testar a amostra com as cargas de 456g e 433g, a mistura retraiu em mais 0,5cm e 1,0cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 10cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 3.3



Mistura 4.0

Mistura 4.0

333g de terra
167g de água
100g de pó de mármore
67g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** A mistura se apresentou mais fluida.
- 2 **Capacidade de construção:** Não apresentou capacidade de alcançar duas camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** No ensaio de estabilidade do cilindro foi notável o alto teor de água na composição em comparação às demais já apresentadas, de modo a apresentar uma retração do cilindro após retirada do molde em 0,5cm de altura, e subsequente com a inserção da primeira carga de 176g, a mistura retraiu mais 2,5cm, com o acréscimo de 114g a amostra cedeu mais 0,2cm. Esta falta de estabilidade da composição ao se inserir uma carga pequena, demonstrou que a proporção da mistura tem a necessidade de ser revista, pois a absorção da cal se difere do pó de mármore. Assim, esta mistura foi determinante para as demais com aplicação do pó de mármore.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 9,5cm

Estético: Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 4.1

Mistura 4.1

333g de terra
149g de água
32g de pó de mármore
65g de cal hidráulica
65g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura não apresentou uma boa capacidade de extrusão manual, de modo a demandar um maior esforço manual para efetivar a extrusão.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição alcançou a capacidade de sobrepor 5 camadas de material.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Inicialmente com a sobreposição do primeiro peso de 176g a mistura não apresentou variação nas suas dimensões, entretanto com o segundo peso de 114g, a composição retraiu em 0,2cm. Posteriormente, ao testar a amostra com as cargas de 456g e 433g, a mistura retraiu respectivamente em mais 0,1cm e 0,1cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9cm
 - o Dia 28- 9cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 4.2

333g de terra
 167g de água
 33g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 67g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** Diferente da composição anterior, esta mistura apresentou mais água, fator que aumenta a trabalhabilidade da mistura e melhorou a capacidade de extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** A mistura adquiriu a capacidade de sobrepor 5 camadas deste material.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Assim como a mistura anterior, inicialmente esta composição não apresentou variações nas suas dimensões. Entretanto, com a sobreposição do segundo peso de 114g, a mistura retraiu em 0,7cm. Posteriormente, ao testar a amostra com as cargas de 456g e 433g, a mistura retraiu respectivamente em mais 0,7cm e 0,8cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 10cm

Estético: Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 4.2

Mistura 4.3

300g de terra
 167g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 67g de areia

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresentou uma boa capacidade de extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Apresentou a capacidade de sobrepor 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Esta composição retraiu assim que saiu do molde em 0,2cm, posteriormente com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a mistura retraiu em 0,3cm e 0,1cm. Ademais, com a inserção das cargas de 456g e 433g, a mistura diminuiu em altura respectivamente em mais 0,7cm e 0,6cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,8cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm

Estético: Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 4.3



Mistura 4.5



Mistura 5.0

Mistura 4.5

300g de terra
193g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
67g de areia

- 1 Capacidade de extrusão:** Com a inserção de mais água nesta mistura, foi observado um ganho de trabalhabilidade na composição e uma ótima capacidade de extrusão manual.
- 2 Capacidade de construção:** Apresentou a capacidade de sobrepor apenas 2 camadas manualmente, entretanto com sua testagem na impressora 3D foi capaz de sobrepor 16 camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** Esta composição retraiu assim que saiu do molde em 0,2cm, posteriormente com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a mistura retraiu em 1,4cm e 0,9cm. Ademais, com a inserção das cargas de 456g e 433g, a mistura diminuiu em altura respectivamente em mais 1,0cm e 0,1cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 10cm
 - Dia 14- 9,5cm (se repartiu em dois pedaços)
 - Dia 28- 9,5cm
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 5.0

298g de terra
192g de água
66g de pó de mármore
66g de cal hidráulica
66g de areia
4g de fibra

- 1 Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresentou a capacidade de ser extrudida manualmente.
OBS: A partir desta composição as amostras foram testadas manualmente com o uso de um bico de confeitiro com 0,5cm de diâmetro, de modo que esta dimensão se assemelha mais com o bico presente na WASP40100.
- 2 Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor um total de 5 camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** Esta composição retraiu assim que saiu do molde em 0,3cm, posteriormente com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a mistura retraiu em 0,7cm e 0,6cm. Em seguida, com a inserção das cargas de 456g e 433g, a mistura diminuiu respectivamente em mais 1,0cm e 0,4cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 9,5cm
 - Dia 14- 9,5cm
 - Dia 28- 9,5cm
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais, mas apresenta uma textura mais áspera por conta da fibra.

Mistura 5.1

299g de terra
 193g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 1g de fibra

- 1 **Capacidade de extrusão:** A argamassa à base de terre apresentou uma ótima extrusão manual e na impressora.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor um total de 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Esta composição retraiu assim que saiu do molde em 0,4cm, posteriormente com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a mistura retraiu em 1,0cm e 1,1cm. Em seguida, com a inserção das cargas de 456g e 433g, a mistura diminuiu respectivamente em mais 0,5cm e 0,2cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 10cm

OBS: Em razão desta mistura ter ficado mais homogênea em comparação com a anterior, esta conseguiu distribuir mais as fibras e reduzir a retração após a cura.

- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais, mas apresenta uma textura mais áspera por conta da fibra.



Mistura 5.1

Mistura 6.0

300g de terra
 164g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 29g de óleo de cozinha

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta composição apresentou uma difícil extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor um total de 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura não retraiu assim que saiu do molde, entretanto com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a amostra retraiu em 0,5cm e 0,5cm. Em seguida, com a inserção da carga 456g a mistura não apresentou variação, e com a carga 433g a mistura diminuiu mais 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,9cm
 - o Dia 14- 9,8cm
 - o Dia 28- 9,8cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 6.0



Mistura 6.1

300g de terra
183g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
10g de óleo de cozinha

- 1 **Capacidade de extrusão:** A capacidade de extrusão melhorou ao diminuir a substituição de água por óleo.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor um total de 5 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura retraiu assim que saiu do molde em 0,5cm, além disso com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a amostra retraiu em 0,5cm e 0,5cm. Em seguida, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 1,0cm e 1,0cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm (se repartiu em dois pedaços)
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 6.1



Mistura 6.2

300g de terra
193g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
10g de óleo de cozinha

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição apresentou uma ótima capacidade de extrusão.
- 2 **Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura retraiu assim que saiu do molde em 0,5cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a amostra retraiu mais 0,5cm e 1,0cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em um primeiro momento mais 0,5cm e depois mais 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,9cm
 - o Dia 14- 9,9cm
 - o Dia 28- 9,9cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Obs: Com o manuseio da amostra para o ensaio fotográfico, esta amostra se partiu.

Mistura 6.2

Mistura 6.3

300g de terra
 135g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 58g de óleo de cozinha

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura não apresentou a capacidade de extrusão no bico de 0,5cm de diâmetro, apenas no bico de 1,8cm. Assim, conclui-se que quanto maior a quantidade de óleo inserido, menor é a trabalhabilidade do material.
- 2 **Capacidade de construção:** Não foi possível desenvolver, a mistura não apresentava aderência entre camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A amostra apresentou pouca variação, a primeira ocorreu com a inserção da carga de 114g, de modo que a argamassa reduziu em 0,3cm de altura. Em seguida, a outra variação presente foi ao inserir a carga de 433g, que reduziu mais 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm (a composição se repartiu em três pedaços, inviabilizando a medição dos demais dias)
 - o Dia 07- -
 - o Dia 14- -
 - o Dia 28- -
- 5 **Estético:** Mistura com uma textura oleosa.



Mistura 6.3

Mistura 6.4

299g de terra
 193g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 10g de óleo de cozinha
 1g de fibra

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição apresentou uma fácil extrusão manual, com grande potencial de ser aplicada na impressora 3D.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 4 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, de forma que a amostra diminuiu inicialmente em 1,2cm, e em seguida mais 1,0cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,5cm e 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 6.4

Obs: Com o manuseio da amostra para o ensaio fotográfico, esta composição se partiu;



Mistura 6.5

Mistura 6.5

299g de terra
183g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
10g de óleo de cozinha
1g de fibra

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição apresentou um pouco menos de fluidez em comparação com a anterior, entretanto ainda foi possível realizar a extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 4 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Assim que a mistura saiu do molde se desestabilizou em 0,6cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a argamassa varia sua dimensão em inicialmente em 0,9cm, e em seguida mais 1,0cm. Posteriormente, com a inserção da carga 456g a argamassa retraiu mais 1,0cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,5cm (se repartiu em dois pedaços)
 - o Dia 28- 9,5cm

Estético: Mistura semelhante com as demais, mas apresenta uma textura mais áspera por conta da fibra



Mistura 7.0

Mistura 7.0

300g de terra
164g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
29g de polpa do cacto

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresentou uma boa capacidade de extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** Assim que a mistura saiu do molde se desestabilizou em 0,8cm. Adiante, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a argamassa varia sua dimensão em inicialmente em 0,6cm, e em seguida mais 1,4cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,7cm e 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 7.1

300g de terra
 135g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 58g de polpa do cacto

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresentou uma ótima capacidade de extrusão manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A argamassa se desestabilizou assim que saiu do molde, diminuindo em 1,0cm a sua altura. Adiante, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a composição variou sua dimensão em inicialmente em 1,5cm, e em seguida mais 0,8cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm

Estético: Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 7.1

Mistura 7.2

300g de terra
 174g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 66g de areia
 58g de polpa do cacto

- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta mistura se apresentou muito fluida e com alta capacidade de extrusão.
- 2 **Capacidade de construção:** Todavia, esta mistura apresentou uma baixa capacidade de construção, de modo a não conseguir sobrepor camadas de material.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A argamassa se desestabilizou assim que saiu do molde, diminuindo em 3,0cm a sua altura. Adiante, com a sobreposição de 176g a mistura chegou no a 0,0cm de altura do material. Este teste demonstrou então que a presente composição apresenta uma baixa capacidade de se estabilizar.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm (a composição se repartiu em três pedaços, inviabilizando a medição dos 28 dias corridos)
 - o Dia 28- -

Estético: Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.



Mistura 7.2



Mistura 7.3

Mistura 7.3

300g de terra
183g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
10g de polpa do cacto

- 1 Capacidade de extrusão:** Esta mistura apresentou uma boa fluidez.
- 2 Capacidade de construção:** A composição conseguiu sobrepor três camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** Inicialmente a mistura ao sair do molde se desestabilizou em 0,2cm. Com a sobreposição das cargas 176g e 114g, a argamassa retraiu respectivamente mais 0,8cm, e em seguida 1,3cm. Ademais, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu mais um total de 1,5cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 9,5cm
 - Dia 14- 9,5cm (a composição se repartiu em dois pedaços, inviabilizando a medição dos 28 dias corridos)
 - Dia 28-
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais e sem variação de textura.

Mistura 7.4

299g de terra
135g de água
67g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
66g de areia
1g de fibra
58g de polpa do cacto

- 1 Capacidade de extrusão:** A composição apresentou uma ótima capacidade de extrusão.
- 2 Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 4 camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** A argamassa não se desestabilizou assim que saiu do molde. Posteriormente, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, a argamassa varia sua dimensão em inicialmente em 1,2cm, e em seguida mais 1,0cm. Adiante, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,5cm e 0,5cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 10cm
 - Dia 14- 10cm
 - Dia 28- 9,5cm
- 5 Estético:** Mistura semelhante com as demais, mas apresenta uma textura mais áspera por conta da fibra.

Mistura 7.4

Mistura 8.0

300g de terra
 193g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 53g de areia
 13g sílica

- 1 **Capacidade de extrusão:** A mistura apresentou um potencial de extrusão, entretanto foi necessário exercer uma maior força em comparação com a argamassa de referência para impressão.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou com a sobreposição das cargas de 176g e 114g, de forma que a amostra diminuiu inicialmente em 0,5cm, e em seguida mais 0,5cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 1,0cm e 0,4cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 9,5cm
 - o Dia 14- 9,4cm (a composição se repartiu em dois pedaços, inviabilizando a medição dos 28 dias corridos)
 - o Dia 28- -
- 5 **Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica.



Mistura 8.0

Mistura 8.1

300g de terra
 193g de água
 67g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 40g de areia
 26g sílica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Com a aplicação desta mistura foi possível extrudir, todavia foi necessário exercer mais força manual em comparação com a argamassa anterior.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 2 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde em 0,3cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 0,7cm, e em seguida mais 0,5cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 1,0cm e 0,1cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,6cm
 - o Dia 28- 9,5cm

Estético: A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica.



Mistura 8.1



Mistura 8.2

Mistura 8.2

275g de terra
145g de água
50g de pó de mármore
75g de cal hidráulica
50g de areia
50g sílica

- 1 Capacidade de extrusão:** Assim como a última mistura, também foi possível extrudir esta composição, todavia foi necessário exercer uma força manual maior em comparação com a argamassa anterior.
- 2 Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde em 0,5cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 0,4cm, e em seguida mais 0,6cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,7cm e 0,8cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 9,5cm (a composição se repartiu em dois pedaços, inviabilizando a medição dos 28 dias corridos)
 - Dia 14- -
 - Dia 28- -
- 5 Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica.



Mistura 8.3

Mistura 8.3

299g de terra
193g de água
40g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
67g de areia
1g de fibra
26g sílica

- 1 Capacidade de extrusão:** Esta composição apresentou capacidade de extrusão, entretanto como as demais misturas com sílica, foi observado uma maior demanda de força manual.
- 2 Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde em 0,5cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 1,0cm, e em seguida mais 0,5cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 1,5cm e 0,0cm.
- 4 Ensaio de fissuração:**
 - Dia 00- 10cm
 - Dia 07- 10cm
 - Dia 14- 10cm
 - Dia 28- 10cm
- 5 Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica e uma textura lisa, sem fibras sobressaindo.

Mistura 8.4

300g de terra
 193g de água
 53g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 67g de areia
 13g sílica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Assim como a composição anterior, esta mistura apresentou capacidade de extrusão, entretanto demandando mais esforço manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura não se desestabilizou assim que saiu do molde. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 2,5cm, e em seguida mais 0,2cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,5cm e 0,3cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,3cm
- 5 **Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica.



Mistura 8.4

Mistura 8.5

300g de terra
 193g de água
 40g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 67g de areia
 26g sílica

- 1 **Capacidade de extrusão:** Como as demais composições anteriores, esta mistura apresentou capacidade de extrusão, entretanto demandando mais esforço manual.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde, de modo que retraiu 0,6cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 1,6cm, e em seguida mais 0,2cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,7cm e 0,4cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 9,5cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica.



Mistura 8.5

Mistura 9.0

299g de terra
135g de água
40g de pó de mármore
67g de cal hidráulica
67g de areia
1g de fibra
10g de óleo de cozinha
58g de polpa de cacto
26g sílica

- 1 **Capacidade de extrusão:** A composição apresentou fácil extrusão manual, de modo que poderia ser menos fluida.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde, de modo que retraiu 1,0cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 1,7cm, e em seguida mais 0,8cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,5cm e 0,8cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 9,5cm
- 5 **Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica. Além disso, é possível encontrar a fibra na textura da superfície.



Mistura 9.0

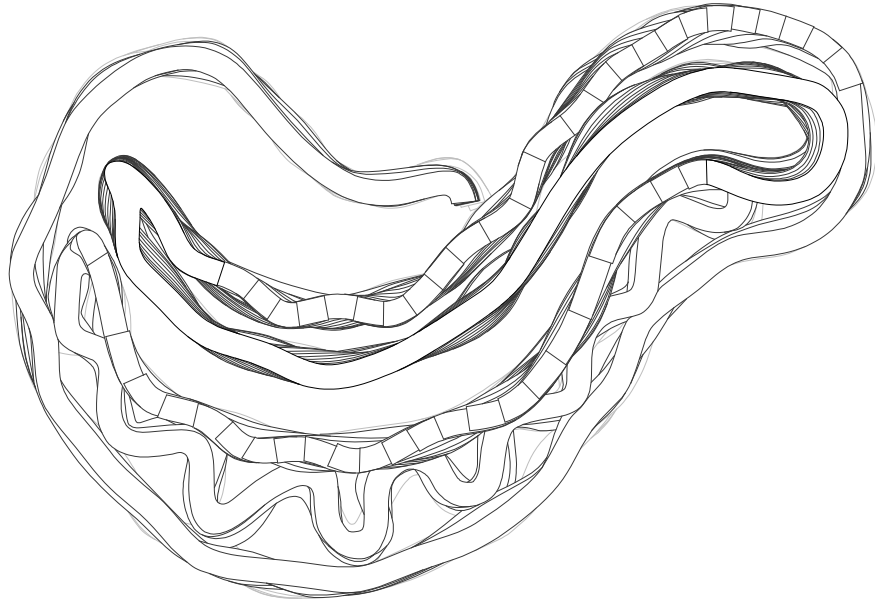
Mistura 9.1

299g de terra
 125g de água
 40g de pó de mármore
 67g de cal hidráulica
 67g de areia
 1g de fibra
 10g de óleo de cozinha
 58g de polpa de cacto
 26g sílica

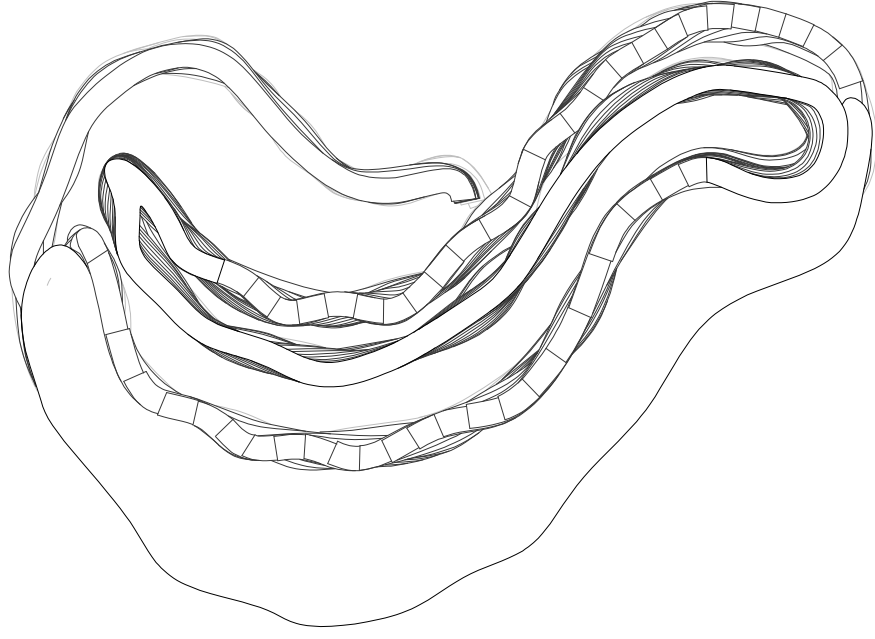
- 1 **Capacidade de extrusão:** Esta composição apresentou uma melhor extrusão manual em relação à mistura anterior.
- 2 **Capacidade de construção:** Esta mistura conseguiu sobrepor um total de 3 camadas.
- 3 **Estabilidade do cilindro:** A mistura se desestabilizou assim que saiu do molde, de modo que retraiu 0,5cm. Em seguida, com a sobreposição das cargas de 176g e 114g a composição diminuiu inicialmente em 0,5cm, e em seguida mais 0,7cm. Posteriormente, com a inserção das cargas 456g e 433g a argamassa retraiu respectivamente em mais 0,8cm e 0,5cm.
- 4 **Ensaio de fissuração:**
 - o Dia 00- 10cm
 - o Dia 07- 10cm
 - o Dia 14- 10cm
 - o Dia 28- 10cm
- 5 **Estético:** A mistura apresenta uma tonalidade mais acinzentada, por conta da sílica. Além disso, é possível encontrar a fibra na textura da superfície.



Mistura 9.1

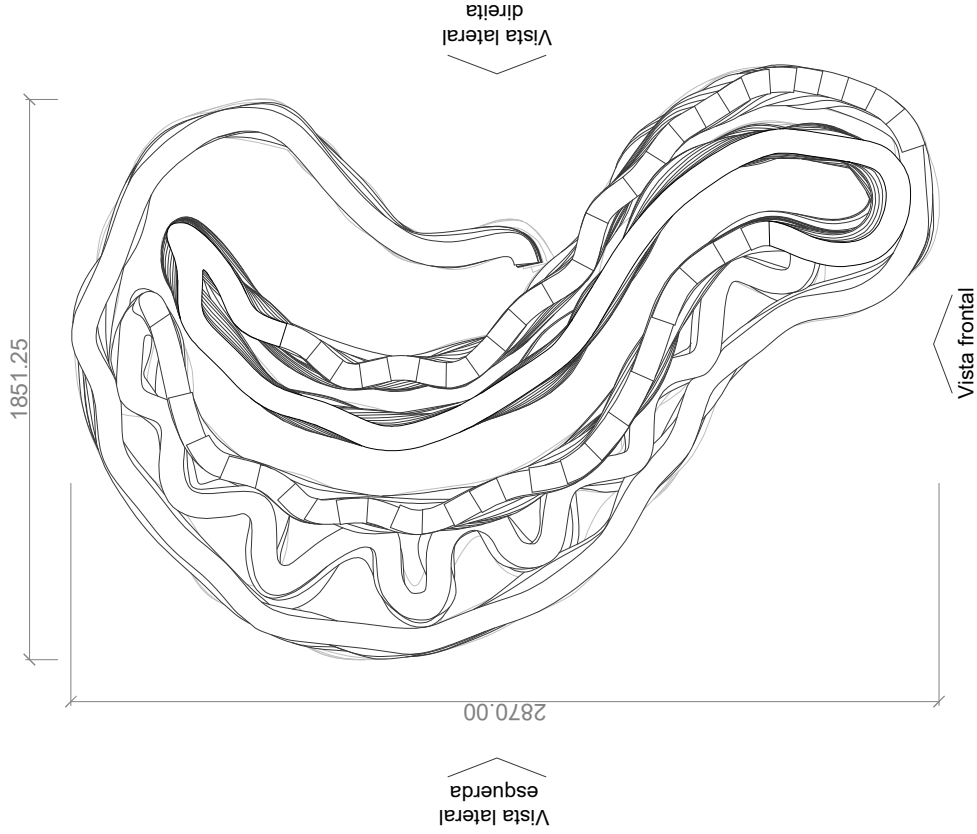


1 Vista superior da estrutura do mobiliário
1/25

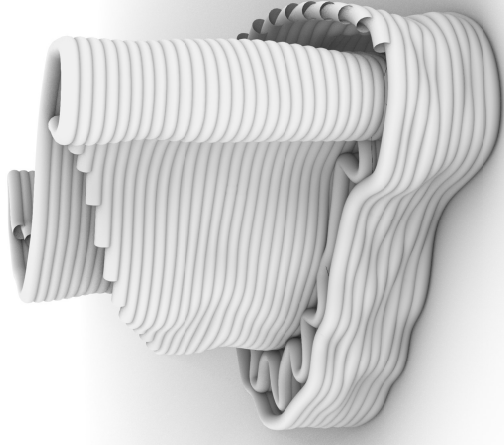


2 Vista superior com o assento do mobiliário
1/25

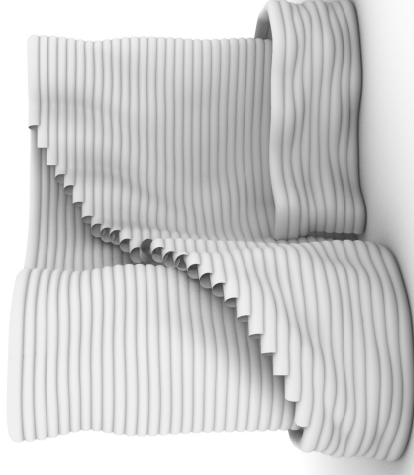
INSTITUIÇÃO		Faculdade de Engenharia e Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto	
CURSO	Mestrado em Design Industrial e de Produto		
ASSUNTO:	Mobiliário urbano - Vista superior		
AUTORA:	Ana Luisa Rodrigues Guimarães		
Unidade:		mm	ESCALA: 1/25
ORIENTADORA:		Bárbara Rangel	
		FOLHA:	01



1 Vista superior da estrutura do mobiliário
1/25

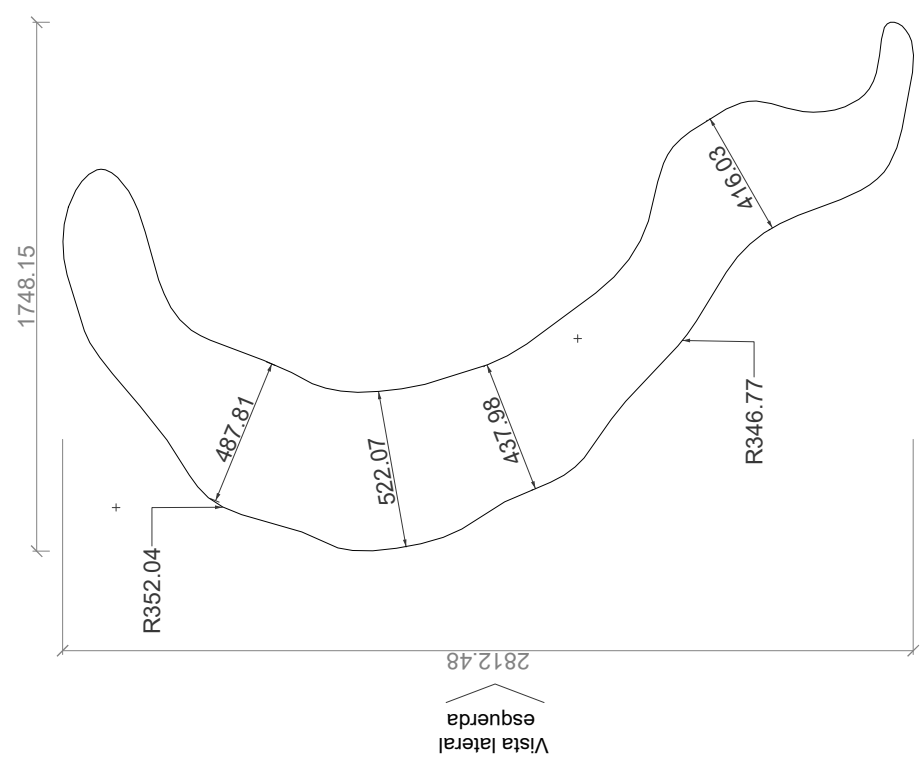


2 Perspectiva do mobiliário



3 Perspectiva do mobiliário

INSTITUIÇÃO		Faculdade de Engenharia e Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto	
CURSO	Mestrado em Design Industrial e de Produto		
ASSUNTO:	Mobiliário urbano - Vista da estrutura		
AUTORA:	Ana Luisa Rodrigues Guimarães		
		Unidade:	mm
		ESCALA:	1/25
		ORIENTADORA:	Bárbara Rangel
		FOLHA:	02



1 Vista superior do assento 1/25

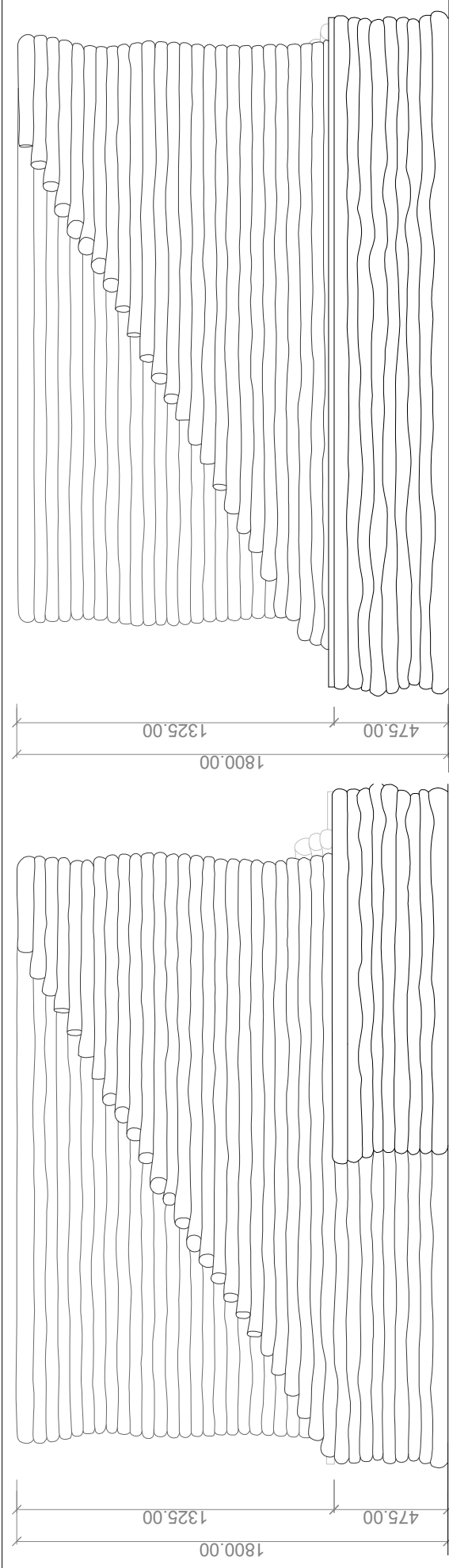


2 Perspectiva do assento -



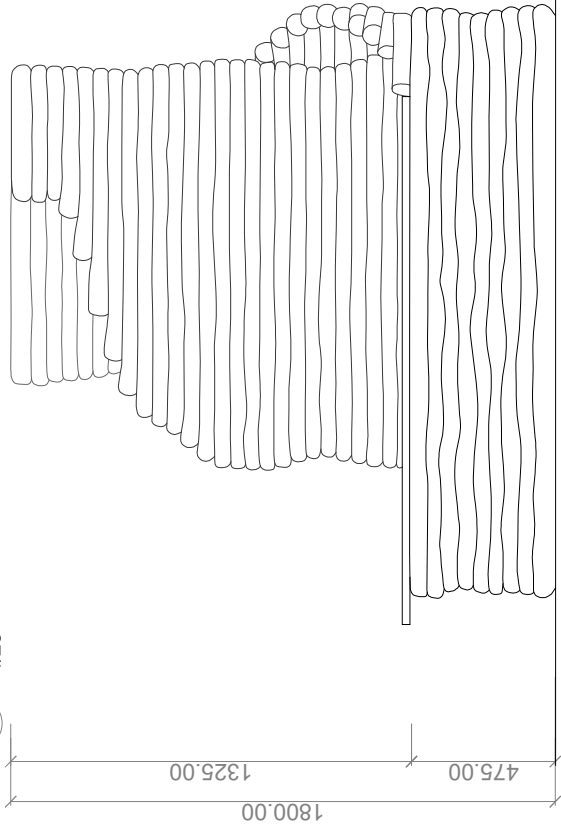
3 Vista lateral esquerda 1/25

INSTITUIÇÃO		Faculdade de Engenharia e Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto	
CURSO	Mestrado em Design Industrial e de Produto		
ASSUNTO:	Mobiliário urbano - Vistas do assento		
AUTORA:	Ana Luisa Rodrigues Guimarães	ORIENTADORA:	Bárbara Rangel
		Unidade:	mm
		ESCALA:	-
		FOLHA:	03

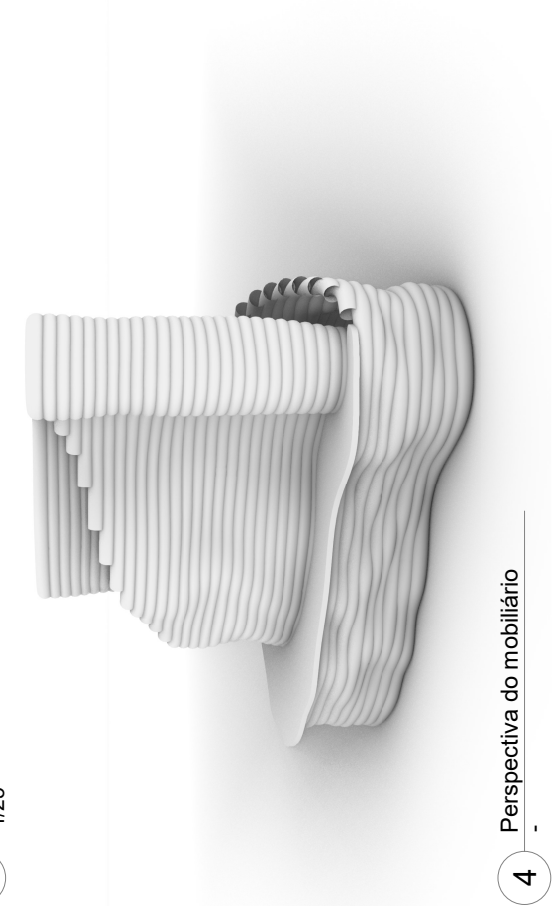


1 Vista lateral direita
1/25

2 Vista lateral esquerda
1/25



3 Vista frontal
1/25



4 Perspectiva do mobiliário

INSTITUIÇÃO		Faculdade de Engenharia e Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto	
CURSO	Mestrado em Design Industrial e de Produto		
ASSUNTO:	Mobiliário urbano - Vistas		
AUTORA:	Ana Luisa Rodrigues Guimarães	ORIENTADORA:	Bárbara Rangel
ESCALA:		Unidade:	mm
		FOLHA:	04