

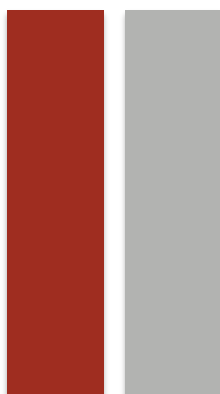
MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

Exploração das possibilidades estéticas de uma argamassa imprimível em 3D, substituindo a areia natural por Resíduos de Construção e Demolição

Joana Menezes e Castro da Mota e Costa

M

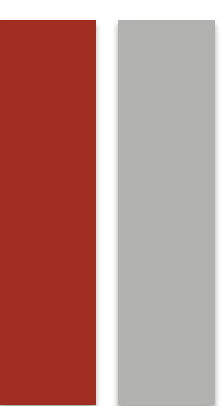
2022



SEDE ADMINISTRATIVA

FACULDADE DE **BELAS ARTES**

FACULDADE DE **ENGENHARIA**



MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutor Rui Mendonça

PROFESSOR AUXILIAR DA FACULDADE DE BELAS ARTES DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutora Bárbara Rangel

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutor Bruno Figueiredo

PROFESSOR AUXILIAR DA UNIVERSIDADE DO MINHO

17

04 NOVEMBRO 2022

MESTRE Joana Costa
MDIP/134

Resumo

A impressão 3D, na construção apresenta-se como uma solução tecnológica sustentável que pode substituir alguns processos de fabrico tradicionais, permitindo reduzir significativamente os desperdícios bem como uma produção otimizada. Porém, as argamassas para impressão 3D, com melhor desempenho, são baseadas em cimento Portland (CP), pelo que, tratando-se de um material com elevadas emissões de CO₂, a sua utilização originará um aumento da pegada ambiental. Esta investigação, seguindo os princípios da economia circular, procurou nos resíduos de construção e demolição (RCD), uma possibilidade de redução da incorporação da taxa de CP, bem como das matérias-primas virgens, como é o caso da areia utilizada na composição da argamassa para impressão. O estudo baseou-se, principalmente, no vidro, tijolo e betão, e o plano experimental assentou numa lógica de tentativa-erro, tendo, ao longo desse processo, surgido novas oportunidades de explorar cores e textura. Para descobrir estas oportunidades, foi feito um conjunto de experiências para encontrar a viabilidade de cada solução. Entretanto, para cada argamassa definida, foi testada a sua capacidade de *workability*, *extrudability* e *buildability*. Após a definição dos melhores RCD a utilizar, foi feito um extenso estudo cromático. Para finalizar, a argamassa com os melhores resultados foi validada numa impressora de 5 eixos, imprimindo uma peça com 5 camadas, que demonstrou a capacidade plástica do novo material. O RCD utilizado na mistura final desta dissertação foi a areia de tijolo que deu à argamassa um pigmento natural alaranjado. Provou-se também que esse mesmo material desenvolvido está apto para impressão 3D e pode ser utilizado para imprimir peças de design standard ou personalizados. Concluiu-se assim que é possível substituir os resíduos naturais nas argamassas por resíduos de construção e demolição, e ainda permite a criação de uma paleta cromática no material cimentício.

Por fim, tendo em consideração toda a aprendizagem, e provada a *printability* do material, foi desenvolvido um novo painel customizável, com uma ilustração facial de linhas orgânicas que demonstra os benefícios da impressão com argamassa. Comparando com moldes este tipo de fabrico consegue realizar peças mais complexas, com maior detalhe e com menores custos. Infelizmente este painel apenas foi possível ser impresso em PLA, mas fica o desejo futuro de ser impresso no material desenvolvido.

Palavras-chave: Construção civil; Impressão 3D; Materiais cimentícios; Sustentabilidade; RCD

Abstract

3D printing in construction is a sustainable technological solution that can replace traditional manufacturing processes, allowing a significant reduction in waste, as well as an optimized production. However, the best performing 3D printing mortars are based on Portland cement (PC), so, being a material with high CO₂ emissions, its use will lead to an increase of the environmental footprint. Following the principles of circular economy, this research sought in construction and demolition wastes (CDW), a possibility of reducing the incorporation rate of PC, as well as virgin raw materials, such as sand used in the composition of the mortar for printing. The study was mainly based on glass, brick and concrete, and the experimental plan was based on a trial-error logic, and along this process, new opportunities to explore colors and texture emerged. To discover these opportunities, a set of experiments was made to find the feasibility of each solution. Meanwhile, for each defined mortar, its workability, extrudability and buildability were tested. After defining the best CDW to use, an extensive chromatic study was carried out. Finally, the mortar with the best results was validated in a 5-axis printer, printing a piece with 5 layers, which demonstrated the plastic capacity of the new material. The CDW used in the final mixture of this dissertation was brick sand that gave the mortar a natural orange pigment. It was also proved that this same developed material is suitable for 3D printing and can be used to print standard or customized design parts. It was thus concluded that it is possible to replace natural waste in mortars with construction and demolition waste, and it also allows the creation of a chromatic palette in the cementitious material.

Finally, taking into consideration all the learning and proved the printability of the material, a new customizable panel was developed, with a facial illustration of organic lines that will prove the benefits of printing with mortar. Compared to molds this type of manufacturing can make more complex parts, with greater detail and at a lower cost. Unfortunately, this panel could only be printed on PLA, but the future wish remains for it to be printed on the material developed.

Keywords: Civil construction; 3D printing; Cementitious materials; Sustainability; CDW

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais por toda a paciência que tiveram comigo ao longo deste percurso, toda a força que me deram quando a única coisa que queria fazer era desistir e por sempre me terem lembrado que a vida se leva a brincar, sem eles é certo que não teria sido possível chegar até aqui.

Seguidamente, agradeço profundamente à minha orientadora, Professora Bárbara Rangel, por ter estado sempre presente e ter tentado sempre que eu desse o melhor de mim.

Agradeço aos Professores Jorge Lino, Lino Maia e Rui Neto pela ajuda nas questões técnicas e pelas opiniões e críticas apresentadas, que ajudaram na construção de todo o trabalho prático desenvolvido.

Ao João Teixeira, um enorme obrigada pela constante disponibilidade e por toda a ajuda dada ao longo de toda a dissertação.

Aos professores e técnicos dos laboratórios LEMC, LMC, Laboratório de Processamento de Minérios no DEMM e INEGI que contribuíram para realização deste projeto.

Ao meu namorado pelo apoio incondicional e por acreditar em mim em todos os momentos mesmo quando eu não era capaz de o fazer.

Ao meu irmão que sempre me ajudou a manter um equilíbrio entre diversão e estudos, sendo a calma em momentos de tempestade.

Ao Luís Luís Maia Maia por toda a ajuda que me deu no desenvolvimento das modelações e por me ter disponibilizado a sua impressora 3D.

Aos amigos do “Fechado ao Domingo” que me mostram que há sempre tempo para os amigos, por muito caótica que a vida esteja. Em especial à minha amiga mais antiga, Joana Duque, por me guiar em momentos de completa desorientação.

Aos meus primos, Mariana e Jorge, por toda a preocupação que têm comigo e por me ajudarem a ultrapassar os momentos de mais ansiedade e stress.

Aos restantes familiares e amigos, não menos importantes, que contribuíram para eu ser aquilo que sou hoje e partilham comigo todas as minhas conquistas.

Um obrigada muito especial a todos vocês
Joana Mota e Costa

“If you are interested in what you do, that keeps you going.”

Stan Lee

Índice

Resumo	4
Abstract	5
Agradecimentos	6
Índice	8
Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	15
Lista de Abreviaturas	16
Lista de Símbolos	17
<i>I. INTRODUÇÃO</i>	<i>18</i>
1. Contexto	18
2. Objetivos	19
3. Metodologia	20
4. Estrutura da tese	20
<i>II. ESTADO DA ARTE</i>	<i>21</i>
1. Introdução	21
2. O vidro	22
2.1. Características	22
2.2. Materiais utilizados	23
2.3. Processos de fabrico - utilização de grande temperatura	23
2.4. Reutilização de vidro	24
3. Impressão 3D com vidro	25
3.1. Métodos	25
3.2. Materiais utilizados	26
3.3. Processos de fabrico	27
4. Impressão 3D com materiais cimentícios	30
4.1. Características	30
4.2. Materiais utilizados	30
4.3. Processos de fabrico	30
5. Impressão 3D de argamassas cimentícias com adição de vidro em substituição do cimento	32
5.1. Métodos	32
5.2. Materiais utilizados	33
5.3. Processos de fabrico	33
6. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	35
6.1. Reciclagem e reutilização de RCD	35
6.2. Utilização de RCD em argamassa	36
6.3. Utilização de RCD em argamassa para impressão 3D	36
7. Pesquisa de Mercado	37

7.1.	Victoria Sustainability	37
7.2.	Montreal's Darwin Bridge	38
III. Caso de Estudo		40
1.	Objetivos	42
2.	Requisitos	43
3.	Metodologia	45
4.	Plano Experimental	46
4.1.	Fase 1: Teste dos acabamentos de argamassas com adição de agregados reciclados	46
	Objetivos	46
	Metodologia	46
	Avaliação e conclusão	50
4.2.	Fase 2: Teste dos acabamentos de argamassas apenas com agregados reciclados de granulometria 3-4 mm	51
	Objetivos	51
	Metodologia	51
	Vidro	51
	Azulejo	53
	Avaliação e conclusão	56
4.3.	Fase 3: Teste da extrusão das argamassas	57
	Objetivos	57
	Metodologia	57
	Vidro	58
	Conclusões	60
	Tijolo	66
	Conclusões	69
	Aglomerado de pneu, plástico e cortiça	69
	Cortiça Negra	70
	Poliestireno expandido	72
	Carvão	73
	Avaliação e conclusão	75
4.4.	Fase 4: Teste da extrusão das argamassas desenvolvidas com redução de cimento	80
	Objetivos	80
	Metodologia	80
	Testes com Tijolo em Pó	81
	Testes com Tijolo Granulometria 4 mm	85
	Testes com Vidro em Pó	86
	Testes com Vidro Granulometria 4 mm	90
	Avaliação e conclusão	91
4.5.	Fase 5: Teste de <i>buildability</i> das argamassas desenvolvidas com redução de cimento	94
	Objetivos	94
	Metodologia	94
	Avaliação e conclusão	100
4.6.	Fase 6: Teste de argamassas desenvolvidas com areia reciclada	102
	Objetivos	102
	Metas a alcançar	102
	Metodologia	102
	Areia de Betão	102
	Conclusões	106
	Areia de Tijolo	107

Conclusões	111
Areia de Vidro	112
Conclusões	115
Avaliação e conclusão	116
4.7. Testes cromáticos	119
4.8. Testes de Granulometria	120
Areia de Betão (anexo B)	120
Areia de tijolo (anexo C)	121
4.9. Conclusões	123
5. Desenvolvimento do Produto	125
5.1. Estudos	125
Modelação do Painel	125
Estudos com plasticina	127
Impressão 3D em PLA	127
Modelação painel geométrico	128
Modelação Final	129
5.2. Impressão Final	130
Preparação da peça para impressão	130
Material	131
Impressão	132
5.3. Proposta de aplicação futura	133
<i>IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	135
1. Conclusões	135
2. Limitações e Perspetivas Futuras	137
Referências	138
Anexos	141
Anexo A - Tabela de Testes	141
Anexo B - Análise granulométrica da areia de betão	142
Anexo C - Análise granulométrica da areia de tijolo	144
Anexo D - Comparação dos agradados (areia de betão e tijolo)	146
Anexo E - Artigo não publicado	147

Lista de Figuras

Figura 1 - Frascos em cristal doublé com aplicação de grãos de vidro, anos 1960/70.....	23
Figura 2 - Impressão 3D de vidro de sílica fundida (adaptada de (Kotz et al., 2017))	25
Figura 3 - Processo de impressão 3D em vidro (adaptada de (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017))	26
Figura 4 - Processamento térmico (adaptado de (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017)).....	27
Figura 5 - Detalhe de um objeto impresso com cor. Primeiro com mudança gradual (parte inferior da peça) e depois com mudança repentina (parte superior da peça)	28
Figura 6 - Impressão 3D por extrusão de vidro fosfatado	29
Figura 7 – Fachada da Paixão (Galeria Fotográfica, Sagrada Família, n.d.)	31
Figura 8 - Tecnologia Binder Jetting (adaptado de (Diagrammatic Representation of a Binder Jetting 3D Printer, n.d.)).....	31
Figura 9 - Tecnologia Material Extrusion (adaptado de (FDM Extrusion Diagram, n.d.)).....	31
Figura 10 - Sustentabilidade na construção rodoviária e civil no Estado de Victoria, Austrália (adaptada de (How Recycled Glass Bottles Are Helping Build Victoria’s Roads of the Future, n.d.))	38
Figura 11 - Construção de ponte com 70 mil garrafas de vidro reciclado em Montreal, Canadá (adaptada de (Montreal’s Darwin Bridge Construction Project Uses Recycled Glass - Montreal Globalnews.Ca, n.d.)).....	39
Figura 12 - Lavagem das garrafas.....	47
Figura 13 - Pesagem dos componentes.....	47
Figura 14 - Mistura no molde.....	47
Figura 15 – Desmoldagem	47
Figura 16 - Teste de amostra com vidro âmbar, cimento cinza e areia – parte de cima.....	47
Figura 17 - Teste de amostra com vidro âmbar, cimento cinza e areia – parte de baixo.....	47
Figura 18 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia, cimento branco e cal hidráulica – parte de cima	48
Figura 19 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia, cimento branco e cal hidráulica – parte de baixo	48
Figura 20 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia e cimento branco – parte de cima	49
Figura 21 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia e cimento branco – parte de baixo ...	49
Figura 22 - Partir as garrafas com auxílio de um martelo.....	52
Figura 23 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4mm	52
Figura 24 - Verter mistura no molde	52
Figura 25 – Desmoldar	52
Figura 26 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4mm – parte de cima....	52
Figura 27 -Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4mm – parte de baixo...52	
Figura 28 - Partir os azulejos com auxílio de um martelo.....	53
Figura 29 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4mm	53
Figura 30 – Verter a mistura no molde	53
Figura 31 - Desmoldar	53
Figura 32 - Teste de amostra com azulejo de granulometria 3-4mm	54
Figura 33 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4mm	54
Figura 34 - Pesar os componentes.....	54

Figura 35 - Misturar os componentes	54
Figura 36 - Verter mistura no molde	54
Figura 37 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4mm	55
Figura 38 - Peneirar os cacos.....	58
Figura 39 - Pesar os componentes.....	58
Figura 40 - Misturar os componentes	58
Figura 41 - Verter mistura para o tubo de silicone.....	58
Figura 42 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 3mm – parte de cima	59
Figura 43 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 3mm – parte de baixo ...	59
Figura 44 - Filamento teste de extrusão com vidro verde de granulometria < 1mm	60
Figura 45 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 1mm – parte de cima	61
Figura 46 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 1mm – parte de baixo ...	61
Figura 47 - Filamento teste de extrusão com vidro verde de granulometria 3-4mm	61
Figura 48 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4mm – parte de cima	62
Figura 49 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4mm – parte de baixo ...	62
Figura 50 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria < 4mm	63
Figura 51 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 4mm – parte de cima	63
Figura 52 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 4mm – parte de baixo ...	63
Figura 53 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria 3-4mm	64
Figura 54 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria 2-3mm	65
Figura 55 - Peneirar os cacos.....	66
Figura 56 - Pesar os componentes.....	66
Figura 57 - Verter mistura para o tubo de pasteleiro	66
Figura 58 - Extrair a mistura	66
Figura 59 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria < 1mm.....	66
Figura 60 - Teste de amostra com tijolo de granulometria < 1mm – parte de cima	67
Figura 61 - Teste de amostra com tijolo de granulometria < 1mm – parte de baixo	67
Figura 62 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria 3-4mm	68
Figura 63 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4mm – parte de cima	68
Figura 64 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4mm – parte de baixo	68
Figura 65 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria 3-4mm	69
Figura 66 - Teste de amostra com material (aglomerado de pneu, plástico e cortiça) de granulometria < 4mm – parte de cima	70
Figura 67 - Teste de amostra com material (aglomerado de pneu, plástico e cortiça) de granulometria < 4mm – parte de baixo	70
Figura 68 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria 3-4mm – parte de cima .	71
Figura 69 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria 3-4mm – parte de baixo	71
Figura 70 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria < 1mm – parte de cima .	71
Figura 71 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria < 1mm – parte de baixo	71
Figura 72 - Teste de amostra com poliestireno expandido de granulometria < 4mm – parte de cima	72
Figura 73 - Teste de amostra com poliestireno expandido de granulometria < 4mm – parte de baixo	72
Figura 74 - Teste de amostra com carvão de granulometria 3-4mm – parte de cima.....	73
Figura 75 - Teste de amostra com carvão de granulometria 3-4mm – parte de baixo.....	73
Figura 76 - Filamento Teste de extrusão com carvão de granulometria < 1mm	74
Figura 77 - Teste de amostra com carvão de granulometria < 1mm – parte de cima.....	74
Figura 78 - Teste de amostra com carvão de granulometria < 1mm – parte de baixo.....	74

Figura 79 - Tijolo granulometria <1mm.....	81
Figura 80 - Tijolo granulometria 3-4mm.....	81
Figura 81 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 67% de tijolo de granulometria < 1mm.....	82
Figura 82 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 85% de tijolo de granulometria < 1mm.....	82
Figura 83 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 90% de tijolo de granulometria < 1mm.....	83
Figura 84 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 95% de tijolo de granulometria < 1mm.....	83
Figura 85 - Filamento Teste de extrudability com 100% de tijolo de granulometria < 1mm..	84
Figura 86 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 67% de tijolo de granulometria 3-4mm.....	85
Figura 87 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 67% vidro de granulometria < 1mm.....	87
Figura 88 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 85% vidro de granulometria < 1mm.....	88
Figura 89 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 90% vidro de granulometria < 1mm.....	89
Figura 90 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 75% de tijolo de granulometria < 1mm.....	95
Figura 91 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 85% de tijolo de granulometria < 1mm.....	96
Figura 92 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 90% de tijolo de granulometria < 1mm.....	97
Figura 93 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 95% de tijolo de granulometria < 1mm.....	98
Figura 94 - Filamento Teste de buildability com 100% de tijolo de granulometria < 1mm ...	99
Figura 95 - Cacos de betão, quebrados com um martelo	103
Figura 96 - Britador.....	103
Figura 97 - Areia de betão, 4mm	103
Figura 98 - Filamento Teste de extrudability com 40% areia de betão	104
Figura 99 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de betão	105
Figura 100 - Filamento Teste de extrudability com 25% areia de betão	106
Figura 101 - Cacos de tijolo, quebrados com um martelo	107
Figura 102 - Britador.....	107
Figura 103 - Areia de tijolo, 4mm.....	107
Figura 104 - Filamento Teste de extrudability com 50% areia de tijolo	109
Figura 105 - Filamento Teste de extrudability com 40% areia de tijolo	110
Figura 106 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de tijolo	111
Figura 107 - Cacos de vidro, quebrados com um martelo.....	112
Figura 108 - Areia de vidro, 4mm	112
Figura 109 - Filamento Teste de extrudability com 50% areia de vidro.....	113
Figura 110 - Filamento Teste de extrudability com 40% areia de vidro.....	114
Figura 111 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de vidro.....	115
Figura 112 - Paleta cromática das composições testadas.	119
Figura 113 - Curva granulométrica da areia de betão	120
Figura 114 - Agitador de peneiros	121

Figura 115 - Distribuição de granulometrias, de cima-esquerda para baixo-direita: 4mm; 1mm; 0,50mm; 0,250mm; 0,125mm; 0,063mm; <0,063mm.....	121
Figura 116 - Curva granulométrica da areia de tijolo.....	122
Figura 117 - Curvas granulométricas de areia de betão e areia de tijolo, comparação dos agregados.....	122
Figura 118 - Jarra Alvar Aalto.....	125
Figura 119 - Painel Vhils em Cortiça (https://www.apcor.pt/entrevista-a-vhils-alexandre-farto/).....	126
Figura 120 - Scanner utilizado (Sense).....	126
Figura 121 - Modelação obtida através do scan.....	126
Figura 122 - Modelação 3D retocada no solidworks.....	126
Figura 123 - Ilustração que dará origem ao painel.....	127
Figura 124 - Modelo 3D do painel autobiográfico.....	127
Figura 125 - Modelo em plasticina (camada 1).....	127
Figura 126 - Modelo em plasticina (camada 2).....	127
Figura 127 - Modelo em plasticina (camada 3).....	127
Figura 128 - Impressão 1/3 do tamanho do painel.....	128
Figura 129 - Impressão 45% do tamanho do painel.....	128
Figura 130 - Modelação Painel 1.....	129
Figura 131 - Modelação Painel 2.....	129
Figura 132 - Modelação Painel 3.....	129
Figura 133 - Modelação Peça 1.....	129
Figura 134 - Modelação Peça 2.....	129
Figura 135 - Modelação Peça 3.....	129
Figura 136 - Modelação final.....	130
Figura 137 - Modelação 3D no Tinkercad.....	131
Figura 138 - Transformação da modelação 3D para código G no software Ultimaker Cura.....	131
Figura 139 - Edição do código G através do CAMotics.....	131
Figura 140 - Impressão do paralelepípedo.....	131
Figura 141 - Protótipo depois de seco.....	131
Figura 142 - Impressão da peça final.....	132
Figura 143 - Peça acabada de imprimir.....	132
Figura 144 - Peça depois de seca.....	132
Figura 145 - Peça final.....	133
Figura 146 - Modelação Painel com Ilustração.....	133
Figura 147 - Impressão em PLA do painel ilustrativo.....	134

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Lista Europeia de Resíduos (adaptada de (Jorge de Brito, 2006))	35
Tabela 2 - Requisitos fundamentais de impressão 3D (Almeida & Mpressão, 2021)	43
Tabela 3 - Requisitos do material para impressão (adaptada de (Teixeira, 2018)).....	44
Tabela 4 - Resultados Testes Fase 1	50
Tabela 5 - Resultados Testes Fase 2.....	56
Tabela 6 - Resultados Testes Fase 3.....	76
Tabela 7 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com tijolo em pó .81	
Tabela 8 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com vidro em pó.86	
Tabela 9 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com vidro de granulometria 4mm.....	90
Tabela 10 - Resultados Testes Fase 4.....	91
Tabela 11 - Guia de percentagem de material para testes de buildability com tijolo em pó .94	
Tabela 12 - Resultados Testes Fase 5.....	100
Tabela 13 - Resultados Testes Fase 6.....	117
Tabela 14 - Dosagem de cada amostra representada na figura 112.	119

Lista de Abreviaturas

3D - Tridimensional
3DCP - 3D Concrete Printing
3DCMP - 3D Cementitious Material Printing
AM - Manufatura Aditiva
AMoC - Additive Manufacturing of Concrete
CAD - Computer-aided design
CDW - Construction and Demolition Wastes
CP - Cimento Portland
DEC - Departamento de Engenharia Civil
DEMM – Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais
DIW - Direct-Ink-Writing
FA – Fabrico Aditivo
FBAUP - Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto
FDM - Fused Deposition Modeling
FE - Fabrico por Extrusão
FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FEVE - The European Container Glass Federation
LDPS - Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços
LEMC - Laboratório de Ensaios Materiais
LER - Lista Europeia de Resíduos
LMC - Laboratório de Materiais de Construção
LSMA - Large Scale Additive Manufacturing
MDIP - Mestrado de Design Industrial de Produto
MIT - Massachusetts Institute of Technology
OPC - Cimento Portland Comum
PC - Portland Cement
PLA - Polylactic acid
PPR - Processos de Prototipagem Rápida
RCD - Resíduos da Construção e Demolição
SAQ - Société des Alcools du Québec
SLA - Estereolitografia
UE - União Europeia

Lista de Símbolos

cm - centímetro

g - grama

km - quilómetro

kg - quilograma

mm - milímetro

ml - mililitro

t - tonelada

°C - grau celsius

€ - euro

% - percentagem

µm - micrómetro

< - inferior

I. INTRODUÇÃO

Esta investigação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado de Design Industrial de Produto (MDIP), na Faculdade de Engenharia (FEUP) e na Faculdade de Belas Artes (FBAUP) da Universidade do Porto, e neste capítulo será apresentado o trabalho desenvolvido ao longo da mesma. O estudo recai sobre o desenvolvimento de um material cimentício, imprimível para uma produção pré customizável, com substituição parcial de Cimento Portland (CP) e quase total dos agregados naturais através da utilização de resíduos de construção e demolição.

1. Contexto

O setor da construção é uma das atividades, na Europa, com mais responsabilidade para o meio ambiente, quer pela emissão de gases poluentes, quer pelo enorme consumo de recursos naturais. Há, para além destes impactos ambientais, uma gestão inadequada dos resíduos de construção e demolição, o que levou a que enormes quantidades destes materiais fossem parar a aterros, sem que se tivesse em conta as repercussões ambientais. (Yazdani et al., 2021) Dentro do ramo da construção, a elaboração de betão é um dos eventos que tem várias consequências a nível ambiental, sendo uma das mais problemáticas, a necessidade de uma grande quantidade de matéria-prima natural, a areia. Na produção de betão encontra-se um excessivo uso de recursos naturais, verificando-se que anualmente, em todo o mundo, são consumidos 1500 milhões de toneladas de cimento, 1000 milhões de toneladas de água e 10000 milhões de toneladas de agregados naturais. Outro grande problema neste setor é a quantidade de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) produzido e quanto do mesmo acaba em aterros. Por exemplo, em Portugal, o valor que RCD produzido quadruplicou de 2004 a 2010. Sem qualquer triagem, uma grande percentagem de RCD é depositada em aterros (Braga, 2015).

Tendo em conta os princípios da economia circular, este estudo identifica a areia proveniente de resíduos de construção e demolição como uma possibilidade de reduzir a utilização de areia natural, e simultaneamente explora explorando novas possibilidades estéticas do 3DP. A literatura indica que é possível criar uma nova paleta de materiais com provenientes mais sustentável. Pretende-se, assim, com este estudo criar um material cimentício, apto para impressão 3D, com a substituição total da areia natural por areia de RCD (como vidro, tijolo e betão), a redução da quantidade de cimento utilizada e, ainda, a pigmentação natural da argamassa.

A impressão 3D de argamassas cimentícias afigura-se uma tecnologia com potencial para orientar a indústria de produção em massa para um caminho mais sustentável que a produção tradicional, uma vez que não necessita de moldes e reduz o tempo e os custos de produção. No que respeita à indústria de construção, em que a argamassa é utilizada como “tinta”, é importante reduzir os agregados naturais e a quantidade de CP para melhorar a sustentabilidade da argamassa. Os processos de impressão 3D com argamassa, apesar de ainda estarem em desenvolvimento e orientados principalmente para a indústria de construção, já têm potencial para serem utilizados em áreas de Design (*Emerging Objects*, n.d.; *XtreeE*, n.d.). Para explorar o potencial deste tipo de impressão devem ser adaptados

I. INTRODUÇÃO

materiais, não só preenchendo requisitos 3DP, mas também abrindo um leque maior de possibilidades cromáticas e sustentabilidade através do reaproveitamento de RCD. A elaboração de betão tem diversas consequências a nível ambiental, para além de necessitar de uma grande quantidade de matéria-prima natural, areia.

Na produção de betão encontra-se um excessivo uso de recursos naturais, verificando-se que anualmente, em todo o mundo, são consumidos 1500 milhões de toneladas de cimento, 1000 milhões de toneladas de água e 10000 milhões de toneladas de agregados naturais. A quantidade de RCD tem vindo a aumentar e, em Portugal, o seu valor quadruplicou de 2004 a 2010. Sem qualquer triagem, uma grande percentagem de RCD é depositada em aterros (Braga, 2015).

Considerando os princípios da economia circular, este estudo identifica a areia proveniente de resíduos de construção e demolição como uma possibilidade de reduzir a utilização de areia natural, e simultaneamente explorando novas possibilidades estéticas no 3DP. A literatura indica que é possível criar uma nova paleta de materiais com provenientes mais sustentável.

Pretende-se, assim, com este estudo criar um novo material de base cimentícia, apto para impressão 3D, com a substituição total da areia natural por areia de RCD, a redução da quantidade de cimento utilizada e, ainda, a pigmentação natural da argamassa.

2. Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação foi a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) no desenvolvimento de um produto para a construção pré fabricada customizável com argamassas cimentícias, substituindo a areia natural, na sua totalidade, por estes resíduos e ainda reduzir a percentagem de cimento utilizado. Os RCD estudados foram o vidro, tijolo e betão, que foram transformados em partículas de baixa granulometria para posteriormente adicionar nas argamassas. A pesquisa teórica e o plano experimental de testagens serviram para o desenvolvimento de um novo material cimentício apto para impressão 3D.

Tem-se como objetivos secundários:

- Explorar diferentes composições de argamassa através da integração de RCD e variação das quantidades de cimento;
- Explorar a capacidade de impressão do material desenvolvido;
- Definir características de destaque do novo material face à argamassa tradicional;
- E desenvolver um material sustentável e com valor estético na peça final impressa, através da criação de uma paleta cromática, utilizando a cor natural do RCD.

3. Metodologia

O desenvolvimento deste projeto teve por base uma série de metodologias para uma melhor organização do processo de investigação e testagem.

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica, capítulo II, que teve por base o estudo de artigos científicos, livros, websites e dissertações sobre diferentes materiais, impressão 3D e reaproveitamento de RCD. Foi também realizado um estudo de mercado, sobre aplicações, já existentes, com a utilização deste tipo de resíduos. Após o estudo teórico sobre o tema, procedeu-se à experimentação, capítulo III. Nesta fase foram realizadas diferentes amostras de materiais cimentícios, experimentados vários substitutos para a areia, com destaque para o vidro e o tijolo, que foram estudados em várias granulometrias. Para além dos testes de material, foram realizados testes de impressão, onde se estudou a *workability*, *extrudability* e *printability* de algumas misturas desenvolvidas, o que permitiu selecionar a argamassa mais adequada para impressão 3D. Com a mistura selecionada, prosseguiu-se para a modelação 3D da peça e, posteriormente, à impressão da mesma, comprovando assim a possibilidade de extrusão da argamassa desenvolvida. Em suma, a dissertação encontra-se dividida em três fases: 1> enquadramento teórico; 2> desenvolvimento de um material cimentício, com agregados reciclados, apto para impressão 3D; 3> impressão de peças que comprovam a utilização da argamassa desenvolvida.

4. Estrutura da tese

O presente documento encontra-se dividido em cinco capítulos.

No primeiro capítulo, Introdução, é identificado o tema da dissertação, bem como os seus objetivos principais, metodologia utilizada e organização da mesma.

No segundo capítulo, Estado da Arte, é apresentada a revisão de literatura. São analisados diferentes materiais, vidro e RCD, estudados diferentes tipos de impressão 3D com diversos materiais, e recolhidas informações sobre reciclagem e reaproveitamento de materiais para integrar argamassas cimentícias.

No terceiro capítulo, Plano Experimental, são desenvolvidas amostras de misturas de materiais cimentícios com substituição da areia por agregados reciclados (vidro, tijolo, betão, poliestireno expandido, carvão, cortiça, etc.). A partir das misturas elaboradas são realizados testes de extrusão e impressão do material, e é selecionado um para impressão. No quarto capítulo, Peças Impressas, é desenvolvida a modelação da peça, e posteriormente, a mesma é impressa em 3D.

No quinto capítulo, Conclusão, são identificados os resultados do projeto, as dificuldades encontradas ao longo do mesmo, bem como apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

Por fim são listadas todas as referências e anexos relativos a esta dissertação.

II. ESTADO DA ARTE

1. Introdução

Uma vez que os recursos naturais estão a escassear, devido ao elevado consumo por parte do ser humano, a indústria tem vindo a procurar soluções sustentáveis. As tecnologias de fabrico aditivo, como por exemplo a impressão 3D, são técnicas que podem substituir alguns dos processos de fabrico tradicionais e têm a seu favor a quase inexistência de desperdícios (Teixeira, 2018).

Os processos de impressão 3D com argamassas cimentícias, apesar de ainda estarem em desenvolvimento e orientados principalmente para a indústria de construção, já têm potencial para serem utilizados em áreas de Design (*Emerging Objects*, n.d.; *XtreeE*, n.d.). Para explorar o potencial deste tipo de impressão, devem ser desenvolvidos novos materiais, não só preenchendo requisitos 3DP, mas também preenchendo lacunas estéticas e de sustentabilidade. A literatura indica que é possível criar uma nova paleta de materiais para os 3DP com provenientes mais sustentável.

Resíduos de Construção e Demolição são materiais que resultam da demolição de edifícios ou resíduos que provêm da construção de novas edificações novos que podem ajudar a esta mudança (Jorge de Brito, 2006). Com o crescimento populacional e a urbanização, houve um aumento significativo dos RCD (Yazdani et al., 2021). A gestão inadequada destes resíduos levou a que enormes quantidades de material fossem parar a aterros, sem que se tivesse em conta as repercussões ambientais.

Assim, com foco na sustentabilidade, pretende-se utilizar argamassas cimentícias para impressão 3D, estudando a possibilidade de substituir os agregados naturais ou o cimento por resíduos de demolição e construção.

2. O vidro

O descarte de vidros pós consumo é um grande problema, devido às suas propriedades inertes que faz com que este material não se decomponha ou sofra qualquer alteração na sua composição com o passar do tempo. Esta característica pode ter grandes impactos ambientais, se o vidro for despejado em aterros, mas a melhor solução é a reciclagem e a mesma é mais viável se for separada por cores, de modo a evitar incompatibilidades químicas no processo de fabricação (Ting et al., 2019).

No Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, há muitos anos atrás, o vidro era separado por cores. Apesar de em termos técnicos ser vantajoso, pois cada cor teria aplicações diferentes, deixou de ser feito pois em termos económicos e de qualidade, os custos de recolha, bem como a qualidade da separação por parte do cidadão não justificavam essa opção. Na área da LIPOR (8 municípios no grande Porto, cerca de 1 milhão de habitantes), foram, em 2020, reciclados apenas 53%. Ou seja, de todo o vidro que lá chegou, 53% (21.000t) foi proveniente da recolha seletiva e foi encaminhado para reciclagem*.

Contudo é de referir que a reciclagem do vidro, para substituição dos agregados naturais, tem inúmeras vantagens a nível ambiental, contribui para a prevenção de recursos naturais, como as areias que são retiradas dos leitos dos rios, reduz as emissões gasosas, com é o caso do Dióxido de Carbono (CO₂), reduz o consumo de energia e evita a disposição de resíduos de vidro em aterros sanitários. É também vantajoso a nível económico uma vez que a reciclagem de vidro torna a sua produção mais barata (*Lipor | Polígrafo Da Reciclagem - Lipor*, n.d.). Como material transparente que é, o vidro passa muitas vezes despercebido no nosso quotidiano (Gato, 2017). Contudo o vidro é um dos produtos mais utilizados no nosso dia-a-dia, um material infinitamente reciclável, o que significa que quando reciclado, é aproveitado na sua totalidade, sem perder nenhuma característica ou propriedade, mantendo a sua qualidade original como se fosse matéria-prima virgem (*Lipor | Polígrafo Da Reciclagem - Lipor*, n.d.).

2.1. Características

O vidro é um material que não pode ser decomposto na natureza. Tem alta resistência e durabilidade, contudo é também um material frágil. É impermeável e com superfícies normalmente sem textura. Dependendo do processo de fabrico as propriedades físicas podem-se alterar, principalmente no caso do pó de vidro (Durán, n.d.).

A complexidade deste material está no comportamento do mesmo quando sujeito a altas temperaturas. Esta é uma das características mais importantes do vidro (Gato, 2017). Este comportamento designa-se por estado vítreo, que consiste na transição do estado de viscosidade (com o aquecimento) e o estado sólido (com o arrefecimento). É de referir que todas as formas que o vidro adquire não são definitivas.

*numa troca de e-mails com a Gestora da Unidade de investigação, Desenvolvimento e Inovação da Lipor, Benedita Chaves.

II. ESTADO DA ARTE

2.2. Materiais utilizados

O vidro é uma substância obtida pela fusão de areia siliciosa com carbonato de sódio ou potássio (Leitores, n.d.). Contudo há diversas combinações de matérias-primas que podem resultar em vidro. Os vidros podem ser classificados em diferentes tipos, sendo os principais, cal sodada, chumbo, sílica vítrea, borossilicato, silicatos alcalinos, aluminossilicato e vidro de bário (Durán, n.d.).

Pensando no futuro desta tese e na aplicação do vidro em argamassas cimentícias, nem todos os vidros são próprios para esta mistura, por exemplo o vidro de cal é adequado para betão enquanto o vidro de chumbo é impróprio. Consoantes as suas propriedades, os resíduos de vidro podem ou não ser reciclados para aplicação em betão.

2.3. Processos de fabrico - utilização de grande temperatura

Os vidros podem ser produzidos por recurso a diversos métodos, mas segundo Oswaldo Luiz Alves, o mais comum é através da fusão dos seus componentes a elevadas temperaturas (Oswaldo Luiz Alves, 1986).

A forma primordial de se trabalhar o vidro foi mantida inalterada durante séculos (Gato, 2017). Um dos movimentos incentivadores de mudança foi o *Studio Glass*, na década de 1960, que levou o vidro para uma versão mais artística, como vemos na figura 1. Houve assim uma alteração da sua produção, de manual para semiautomática.



Figura 1 - Frascos em cristal doublé com aplicação de grãos de vidro, anos 1960/70

Apesar de não comprovados, existem relatos que referem que o vidro apareceu no Oriente em meados do milénio 3º a 5º a.C. onde eram usadas técnicas de vidro modelado. Era trabalhado a partir de refundição de material em fornos, sendo este normalmente misturado com materiais cerâmicos.

Com o passar do tempo no século III a I a.C. houve uma evolução na forma de trabalho do vidro passando a ser usada a técnica de vidro soprado. Com este desenvolvimento apareceram técnicas como a lapidação, esmaltagem e decoração de vidro, técnicas que se conservaram até aos dias de hoje.

Com o Renascimento a indústria do vidro sofreu uma grande alteração, passando a utilizar-se técnicas semiautomáticas. Perdeu-se assim muito do trabalho manual/tradicional que fez com que a mecanização dos processos tomasse posse. A sua produção passou a ser em massa e o sopro humano foi substituído por sopro mecânico.

II. ESTADO DA ARTE

O vidro pode ser assim dividido em 3 técnicas fundamentais: modelado, soprado e automatizado. É um material em constante desenvolvimento, com novas técnicas a serem exploradas todos os dias. É exatamente o que se pretende com esta tese, explorar mais uma utilização do vidro.

“A História do vidro não fica por aqui. Este material está em constante desenvolvimento tecnológico e as áreas de aplicação são cada vez mais exploradas e diversificadas, servindo a sofisticação contemporânea e os hábitos de consumo.”

Aurora Faustino Gato, 2017

2.4. Reutilização de vidro

Segundo FEVE – *The European Container Glass Federation* nos últimos 25 anos a produção de vidro aumentou 39,5%. Contudo, foi também nos últimos 20 anos que o peso das garrafas diminuiu 30% por questões ambientais, mantendo intacta a sua reciclabilidade. O vidro é uma história em constante crescimento, neste momento, na Europa, 87% das pessoas preferem embalagens de vidro, não só por serem recicláveis, mas por permitirem reenchimento e serem facilmente reutilizáveis. O vidro é considerado assim uma *neverending story*.

A indústria de embalagem de vidro da UE contribui para economia circular: 1 tonelada de vidro reciclado salva 1.2 toneladas de material virgem e evita as emissões de CO₂ até 60% (*Introducing the Glass Hallmark - FEVE, n.d.*).

Apenas parte do vidro doméstico reciclado é reutilizado, isto porque existem custos elevados associados à sua reutilização em vidro novo. Altas temperaturas de fusão, recolha, transporte e tratamento são algumas das fases dispendiosas da reutilização do vidro (Durán, n.d.). Assim é preciso arranjar novas formas de aplicar o vidro que vai parar aos ecopontos.

3. Impressão 3D com vidro

Uma vez que o objetivo deste trabalho é aferir da possibilidade de utilização de vidro reciclado na impressão 3D, sentiu-se necessidade de saber mais sobre a impressão 3D de vidro, os seus métodos, materiais e processos de fabrico. Compreender o seu desenvolvimento nos dias de hoje, a sua fiabilidade, o que existe neste campo e como pode ser melhorado, pode determinar o caminho desta tese.

3.1. Métodos

Iniciou-se por analisar vários estudos recentes, uma vez que a impressão 3D em vidro é ainda algo muito recente.

Um grupo do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (Klein et al., 2015), apresentou uma impressora com o primeiro sistema de extrusão 3D de vidro fundido para a criação de peças transparentes. Embora fosse precisamente o que se queria tentar fazer, esta impressora encontra-se ainda em desenvolvimento.

Frederik Kotz relata um processo de impressão que converte um nanocomposto de sílica fotocurável em vidro de sílica fundido por meio de tratamento térmico. Fala ainda da criação de vidros coloridos através da junção de sais metálicos. Trata-se de Impressão 3D por meio de estereolitografia (SLA) e este método despertou bastante interesse, uma vez que se trata de um dos processos de fabrico aditivo (FA) mais usados e com elevada precisão e detalhe. (Kotz et al., 2017)

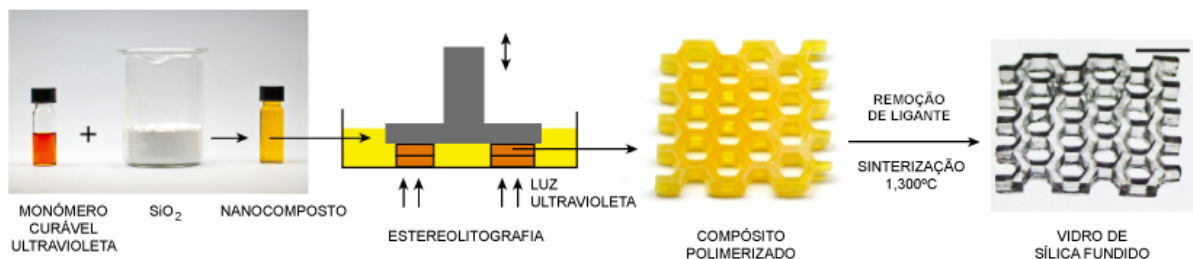


Figura 2 - Impressão 3D de vidro de sílica fundida (adaptada de (Kotz et al., 2017))

Du T. Nguyen, utiliza uma técnica de montagem camada por camada, onde a tinta, composta por pó de sílica, sai por um bocal num padrão previamente desenhado e programado. Trata-se de um método com tintas de sílica em suspensão num líquido que são impressas utilizando o método de impressão direta de tinta, *Direct-Ink-Writing* (DIW). Este método levantou bastante interesse por não ser um PPR mas sim uma técnica em ascensão que pode vir a substituir as técnicas de impressão 3D convencionais (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017).

II. ESTADO DA ARTE

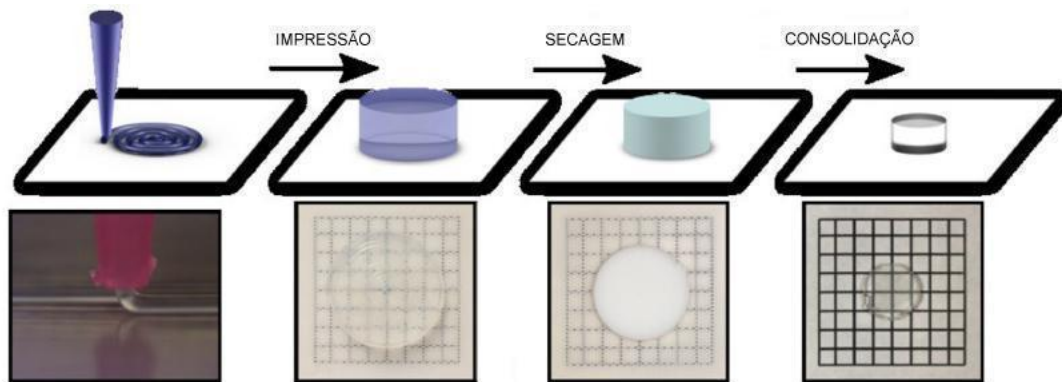


Figura 3 - Processo de impressão 3D em vidro (adaptada de (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017))

Analisou-se a utilização de processos de FA para a extrusão do vidro, usando um alimentador de filamentos, cujo método é descrito por E. Baudet (Baudet et al., 2019). Este artigo foi o que revelou ser de maior interesse, pois a temperatura utilizada foi de apenas cerca de 70°C acima da temperatura máxima de trabalho do polímero convencional de impressoras 3D.

Neste seguimento analisou-se uma abordagem de impressão 3D, com base na extrusão direta de vidro de fosfato, através de um processo de modelação por extrusão (FE). Reda Mohammed Zaki (Zaki et al., 2020) descreve a impressão 3D por meio de modelação por deposição de filamentos a altas temperaturas. Podemos concluir que o FA tem atraído muito interesse nos últimos anos e o FE se tem vindo a mostrar ser um processo utilizado com os mais variados materiais.

3.2. Materiais utilizados

A temperatura de transição vítrea e a estabilidade térmica são os principais fatores para a composição da matéria-prima de vidro. São parâmetros relevantes para o processo de impressão 3D pois permitem avaliar a capacidade de modelação (*printability*) do vidro.

No projeto do MIT é utilizado vidro de soda, devido à baixa temperatura que necessita para ser trabalhado. Neste momento a impressora está a ser desenvolvida para este tipo de vidro, mas John Klein, diz que no futuro deverá ser possível a utilização de uma vasta gama de outros vidros, vidros de silicato, de borato e de fosfato, bem como sistemas de vitrocerâmica (Klein et al., 2015). O vidro de soda é um vidro barato e de fácil operação, seria o vidro ideal para um projeto como esta tese, mas o facto de estar ainda em desenvolvimento é o grande entrave a esta opção.

Noutro projeto, a base foi a criação de um nanocompósito, feito a partir de componentes de vidro de sílica fundida transparente. O artigo de Frederik Kotz abriu portas para a criação de “um novo material” a ser tido em consideração como hipótese para esta tese (Kotz et al., 2017).

Du T. Nguyen, por não utilizar altas temperaturas durante a impressão, desenvolveu tintas compostas por pó de sílica que podem ser impressas tridimensionalmente. Este material

II. ESTADO DA ARTE

permite recursos de maior resolução, devido à capacidade de extrusão de filamentos mais finos. Contudo este material mostrou ter uma enorme desvantagem, que decorre de os vidros sinterizados revelarem uma maior fragilidade e tornarem-se opacos (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017).

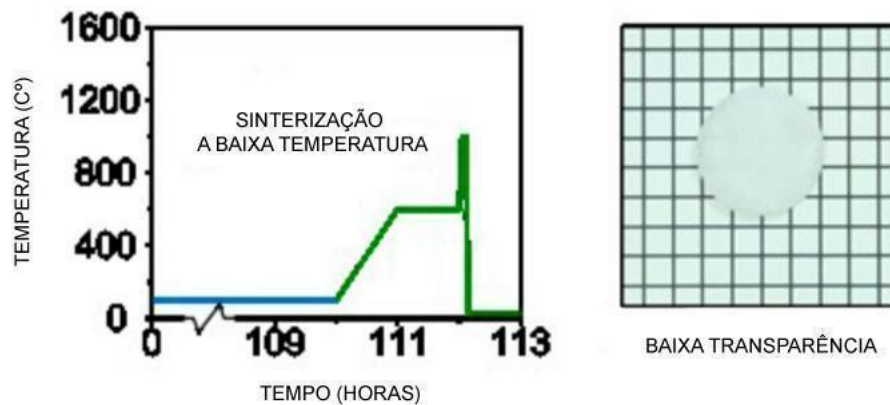


Figura 4 - Processamento térmico (adaptado de (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017))

Numa nova abordagem, E. Baudet opta por explorar vidros com baixa temperatura de transição vítrea (188°C). Este artigo continua a ser uma referência dada a utilização de baixas temperaturas de manuseamento do vidro (Baudet et al., 2019).

Reda Mohammed Zaki, utiliza vidros de fosfatos pois possuem boa estabilidade térmica e química. É interessante ver que uso deste tipo de vidro é bastante comum em estudos académicos e aplicações tecnológicas (Zaki et al., 2020).

3.3. Processos de fabrico

Os processos de fabrico tiveram que ser analisados com detalhe para compreender o que seria possível ou não de replicar. Perceber que impressoras 3D foram utilizadas e de que formas estas foram alteradas para suportar as altas temperaturas necessárias para a impressão do vidro.

O projeto do MIT utiliza um processo aditivo que opera a altas temperaturas para criar peças 3D com o auxílio de um computador. Os modelos de design CAD (*Computer-aided design*) são desenhados no programa Rhinoceros 5.0, fazendo com que as peças sejam de fácil repetição. O aperfeiçoamento do projeto envolveu o controle do bico cerâmico, a modelação tendo em conta a viscosidade do vidro, o ajuste de temperatura e a variação da altura e espessura das camadas. John Klein provou também que a integração de cores é possível e que em nada afeta a impressão. Trata-se assim de uma técnica inspiradora, mas com a impressora ainda em desenvolvimento (Klein et al., 2015).

II. ESTADO DA ARTE

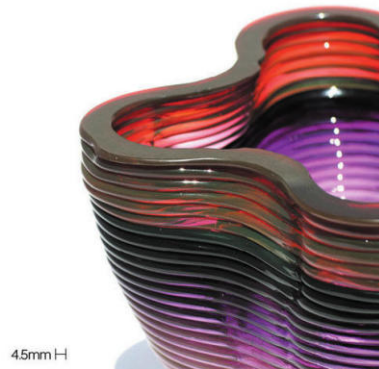


Figura 5 - Detalhe de um objeto impresso com cor. Primeiro com mudança gradual (parte inferior da peça) e depois com mudança repentina (parte superior da peça)

Utilizando uma impressora de estereolitografia comercial do tipo Asiga Pico 2 (adquirida na 3DXS, Alemanha), que permitiu a construção, camada por camada, de componentes tridimensionais em vidro, Frederik Kotz, (Kotz et al., 2017) conclui que a impressão 3D em vidro de sílica fundida permitirá a construção de formas complexas, transparentes e resistentes. Este processo que torna um dos materiais mais antigos da história acessível às técnicas modernas de impressão 3D. É uma solução não viável para esta tese pois fala-se da utilização de uma impressora cujo valor ronda os 10.000€.

Du T. Nguyen, divide o processo em duas partes: formação, impressão 3D (DIW) e sinterização. Após a impressão, as peças são secas a uma temperatura abaixo do ponto de fusão da sílica para formar estruturas de vidro sólidas e transparentes. Esta abordagem não requer altas temperaturas durante a impressão e a temperatura ideal de secagem são 100°C. Existem dois grandes desafios neste processo: a tinta ter um comportamento reológico e secar sem rachar. (Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, 2017)

E. Baudet, (Baudet et al., 2019) utiliza uma tecnologia de FA, que usa um sistema contínuo de filamento extrudido camada por camada. O material impresso é arrefecido para as peças impressas não terem fissuras, contudo a formação de bolhas é um problema comum na fabricação aditiva. Os resultados mostraram que não há modificações na composição química e térmica do vidro impresso, demonstrando a viabilidade de FA de vidro. É um processo muito interessante, pois, foi possível usar uma impressora 3D comercial a uma temperatura de cerca de 330°C.

Pretende-se que a extrusora atingisse uma temperatura de 500°C em vez de 260°C para isso foi utilizada uma impressora de mesa GeeeTech Prusa i3 clone Prusa (Shenzhen, China) modificada. O filamento é extrudido através do bico e depositado, por camadas, na placa de construção mantida a 350°C. A abordagem de impressão 3D de vidro com base FE para produzir peças de vidro de fosfato opticamente transparentes e altamente densas com resolução de camada de 100 µm. Reda Mohammed Zaki fez composições de vidro puramente inorgânicas para serem extrudidas com sucesso. Este processo volta a ter o problema das altas temperaturas de impressão apesar de a impressora ter as condições ideais para testes, não ultrapassando o valor de 400€ (Zaki et al., 2020).

II. ESTADO DA ARTE



Figura 6 - Impressão 3D por extrusão de vidro fosfatado

Relativamente à impressão 3D de vidro, com base nos artigos analisados ao longo deste capítulo, pode concluir-se que embora seja uma técnica inovadora, requer impressoras que atinjam elevadas temperaturas derivadas da temperatura de fusão do vidro.

4. Impressão 3D com materiais cimentícios

A este tipo de processo pode atribuir-se vários nomes, LSMA (Large Scale Additive Manufacturing), AMoC (Additive Manufacturing of Concrete) ou 3DCMP (3D Cementitious Material Printing). É uma técnica ainda em desenvolvimento, e vocacionada essencialmente para a construção civil, mas com potencial de utilização imediata na área do Design (XtreeE, n.d.) (*Emerging Objects*, n.d.).

4.1. Características

A impressão 3D com materiais cimentícios apareceu para agilizar os processos de fabrico com betão. Os processos tradicionais de construção promovem o desperdício e condicionam a forma da peça, mas a fabricação de peças cimentícias por meio de impressão vem resolver esses problemas. Com esta tecnologia deixa de ser necessário o uso de cofragem, acrescentando ainda o facto de ser uma técnica sustentável e com liberdade formal (Teixeira, 2018).

4.2. Materiais utilizados

Os materiais cimentícios são dos materiais mais utilizados no mundo porque o betão é um agregado de baixo custo. Contudo, o facto de ser uma matéria-prima barata, faz com que exista muito desperdício desnecessário. (Teixeira, 2018)

Para além do desperdício, o uso de betão tem um grande impacto ambiental devido às emissões de dióxido de carbono (CO₂). Esta situação origina a existência de uma procura, em todo o mundo, por novos materiais que possam substituir, total ou parcialmente, o cimento. A microssílica é um exemplo de substituto, tendo a vantagem de ser reciclável. (Durán, n.d.) Este exemplo abre portas para a reutilização de resíduos nas argamassas cimentícias, que no caso desta tese será o vidro.

4.3. Processos de fabrico

Na produção com betão, um fator que pode possibilitar a diminuição de desperdício é adotar a utilização de concepções simples.

A adoção de tecnologias de impressão 3D permite, contudo, acelerar a criação de “peças” com formas mais complexas. Esta técnica está a ser utilizada, por exemplo, na construção da Sagrada Família, Barcelona. (Teixeira, 2018)

II. ESTADO DA ARTE



Figura 7 – Fachada da Paixão (Galeria Fotográfica, Sagrada Família, n.d.)

A impressão 3D com materiais cimentícios é um processo de fabricação aditivo que tem vindo a crescer na última década. Existem diferentes técnicas de impressão 3D sendo duas das principais, a tecnologia de *Binder Jetting*, que utiliza um material de granulometria fina colocado por camadas e mantido unido por um ligante pulverizado, e a tecnologia de *Material Extrusion*, que trabalha com a extrusão de material depositado, também, por camadas (TAM, n.d.) (Teixeira, 2018).

Esta primeira técnica, *Binder Jetting*, conhecida por impressão por deposição de ligante, pode ser usada para imprimir peças com grande complexidade de forma, e previne o desperdício, porque apenas usa material onde este é necessário, deixando por preencher os espaços que devem ficar vazios. O material que sobra pode assim ser utilizado para outra impressão. No caso da técnica *Material Extrusion*, como não existe material de suporte, a liberdade geométrica é afetada, contudo a textura dada pelo processo de fabricação em camadas pode ser uma forma de investigar novas possibilidades estéticas (Teixeira, 2018) (Jorge de Brito, 2006).

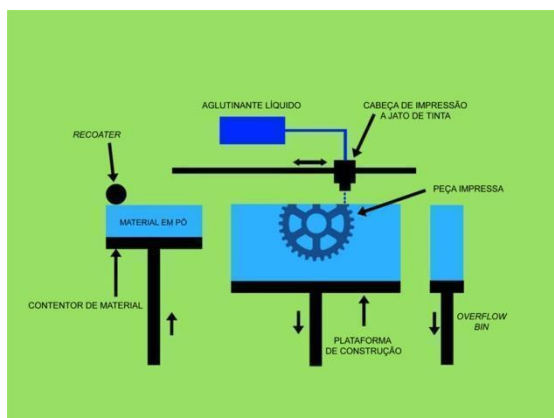


Figura 8 - Tecnologia Binder Jetting (adaptado de (Diagrammatic Representation of a Binder Jetting 3D Printer, n.d.))

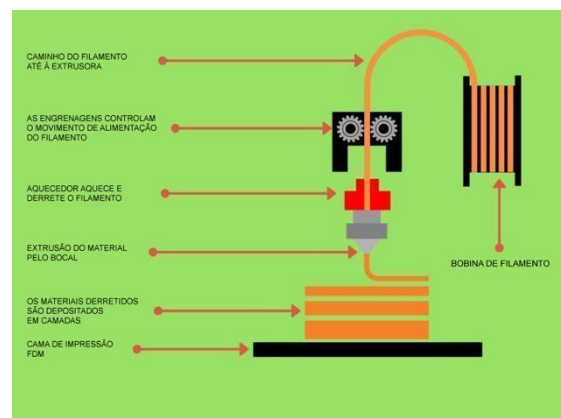


Figura 9 - Tecnologia Material Extrusion (adaptado de (FDM Extrusion Diagram, n.d.))

5. Impressão 3D de argamassas cimentícias com adição de vidro em substituição do cimento

Uma vez que no capítulo anterior foi eliminada a opção de impressão 3D de vidro, decidiu-se explorar a impressão 3D de argamassas cimentícias com adição de vidro. Compreender, uma vez mais, os seus métodos, materiais e processos de fabrico.

Nos últimos anos o vidro tem servido com agregado fino para materiais cimentícios e o pó de vidro como material cimentício suplementar no betão. O uso destes materiais já oferece melhorias, a utilização de vidro diminui a procura de areia (recurso natural finito) e a aplicação do pó de vidro reduz também o uso de cimento, que por consequência reduz a poluição ambiental e o consumo de energia gasto na sua produção (Zaki et al., 2020).

5.1. Métodos

Coloca-se a seguinte questão: Poderá substituir-se total ou parcialmente a areia natural no betão por vidro residual finamente moído? Na Universidade da Beira Interior, L.A. Pereira de Oliveira (Oliveira, 2008) diz que a resistência à compressão das misturas de betão melhora com o aumento da percentagem de resíduos de vidro em substituição da areia. Estes resultados elevam a possibilidade de reciclagem do vidro, que nem sempre é possível devido a impurezas, custos, mistura de cores, acabando em aterros. O vidro foi moído, para substituir a areia no betão. Foram realizados testes de resistência à compressão ao 7º, 28º e 90º dias. Foram também realizados testes de absorção e impermeabilidade. Estes ensaios serviram para verificar o potencial do betão após a substituição do agregado fino. Este estudo tem como foco as propriedades mecânicas e durabilidade do betão contendo resíduos de vidro. Uma proposta que deixa em aberto a possibilidade de substituir a areia por vidro na sua totalidade e não só parcialmente.

Já o artigo de Guan Heng Andrew Ting, (Ting et al., 2019) oferece uma forma de potenciar a utilização de vidros não separados de forma sustentável.

A impressão tridimensional de betão é a combinação de extrusão de material cimentício com controle de movimento robótico para construir estruturas por meio de uma operação de estratificação. Uma vez que a impressão 3D está em crescimento na construção civil examinou-se o uso de vidro reciclado (de cor mista) como agregado fino no betão, para aplicações nesse método. Um dos estudos que mais despertou interesse, pois fala da utilização de vidro reciclado, que foi desde o início a intenção desta tese.

No artigo de Biranchi Panda (Panda & Tan, 2019) é explorado o uso de argamassa de cinza volante de elevado volume modificada com microssílica para impressão 3D de betão. Pretende-se investigar o desempenho das argamassas com a adição de microssílica estudando a seu limite de cedência, viscosidade e enrijecimento, e por fim testar a impressão 3D da mistura numa impressora Gantry de 4 eixos. Uma proposta com estrutura semelhante ao que se pretendia fazer. Criação de um material cimentício, adição de vidro à argamassa e impressão 3D da mesma.

II. ESTADO DA ARTE

5.2. Materiais utilizados

A base das argamassas é o cimento. As mais comuns são constituídas por cimento, areia e água. Normalmente é adicionado um outro material que pode ser por exemplo cal, resinas, entre outros para obter outro tipo de propriedades.

A mistura é feita através de cimento Portland comercial tipo CEM I 42,5R, cinza volante, areia natural (agregado fino), pedra granítica (agregado grosso) e água. Nesta mistura é utilizado um cimento de alta qualidade que permite produzir betão de elevada resistência e que é fácil de ser trabalhado e aplicado (Oliveira, 2008).

Os materiais existentes de impressão 3D em betão devem possuir alta capacidade de extrusão e fluidez, alta retenção de forma na extrusão e alta capacidade de construção para suportar as camadas depositadas. As matérias-primas usadas por Guan Heng Andrew Ting (Ting et al., 2019) para o aglutinante foram cimento Portland comum, sílica ativa e cinzas volantes. Posteriormente foram usados dois agregados diferentes, areia fina do rio e vidro reciclado. Como referido acima, este artigo despertou particular interesse não só por misturar vidro na argamassa cimentícia, mas por adicionar vidro reciclado.

Biranchi Panda (Panda & Tan, 2019) utiliza uma mistura que contém cinzas volantes classe F, cimento Portland CEM 1, microssílica, areia de rio e água/aglutinante. O principal desafio associado ao desenvolvimento de um material para impressão é a tixotrópica, que significa que o betão tem que ter alta densidade de escoamento e baixa viscosidade. Esta proposta de material alternativo deve-se ao negativo efeito ambiental do Cimento Portland Comum (OPC). O betão produzido neste projeto é duplamente interessante, pois para além de tornar possível a reutilização de vidro utiliza também cinzas volantes que são problemáticas quando depositados no meio ambiente.

5.3. Processos de fabrico

O processo de fabrico adotado envolveu as seguintes fases:

Foi triturado vidro âmbar para produzir areia de vidro e substituir a areia natural em 25, 50 e 100%. Houve um aumento na resistência do betão com o aumento do vidro. Esta substituição pode melhorar o empacotamento das partículas dos agregados pelo efeito de enchimento. Também se verificou uma redução no coeficiente de absorção do betão, pois ao melhorar o empacotamento das partículas a quantidade de poros é reduzida. Este estudo mostrou resultados benéficos a níveis económicos e ambientais. Este projeto torna possível a substituição total de areia por pó de vidro, algo que traria um imenso impacto ambiental para esta tese (Oliveira, 2008).

Guan Heng Andrew Ting, (Ting et al., 2019) refere que os resultados finais mostraram a vantagem da incorporação do vidro no betão para impressão 3D. Apesar das propriedades mecânicas serem inferiores na amostra de betão com vidro reciclado, houve melhorias na fluidez do material. Isto mostrou a viabilidade do agregado e com a otimização dos materiais cimentícios em vidro reciclado será possível alcançar *buildability*, fluidez e resistência mecânica. Será também possível aumentar a taxa de reciclagem do vidro consideravelmente. Neste projeto vê-se realizado aquilo para que se está a trabalhar, a reutilização de vidro nas argamassas cimentícias para impressão 3D. Um exemplo a seguir nesta tese.

II. ESTADO DA ARTE

Biranchi Panda, (Panda & Tan, 2019) verificam que ao acrescentar microssílica no final aumentou a rigidez da mistura e a resistência da mesma. Ao aumentar a capacidade de impressão da mistura, a adição de microssílica fez o material ter a tixotropia ideal para a aplicação em impressão de betão. Este projeto mostra que o betão com adição de sílica adquire uma viscosidade ótima para impressão 3D.

De uma forma geral estes estudos vieram comprovar que a adição de vidro nas argamassas cimentícias funciona e que é possível construir peças por impressão 3D com este material. Assim este será o caminho a seguir, estudar a inclusão de diferentes granulometrias e cores de vidro no betão, de forma a conseguir imprimir peças com diferentes texturas e cores.

6. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são materiais que resultam da demolição de edifícios ou resíduos que provêm da construção de novos edifícios. (Jorge de Brito, 2006) Com o crescimento populacional e a urbanização, houve um aumento significativo dos RCD (Yazdani et al., 2021). A gestão inadequada destes resíduos levou a que enormes quantidades de material fossem parar a aterros, sem que se tivesse em conta as repercussões ambientais.

Segundo o capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (LER), (Jorge de Brito, 2006) os resíduos de construção e demolição são catalogados (tabela 1) da seguinte forma:

Tabela 1 - Lista Europeia de Resíduos (adaptada de (Jorge de Brito, 2006))

Código	Descrição
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 02	Madeira, vidro e plástico
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão
17 04	Metais (incluindo ligas)
17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção, contendo amianto
17 08	Materiais de construção à base de gesso
17 09	Outros resíduos de construção e demolição

6.1. Reciclagem e reutilização de RCD

A uma escala mundial, a maioria dos RCD são colocados em aterros. Assim, o aproveitamento destes materiais deve ser vulgarizado na construção civil, uma vez que este tipo de desperdício apresenta elevada capacidade para ser reutilizado e reciclado. (Barros, 2017)

Contudo, como os RCD são constituídos por vários materiais com características distintas, cada um deles terá o seu tipo de reaproveitamento (Jorge de Brito, 2006).

O processo de reciclagem dos RCD começa pela britagem do material, com uma granulometria reduzida, ficando sob a forma de agregado, agregado reciclado. Os agregados reciclados são uma ótima alternativa aos agregados naturais nas argamassas. Esta substituição e reciclagem faz com que os agregados reciclados tenham um custo inferior aos agregados convencionais e previne-se o uso de materiais virgens (Barros, 2017).

II. ESTADO DA ARTE

6.2. Utilização de RCD em argamassa

A elaboração de betão tem diversas consequências a nível ambiental, para além de necessitar de uma grande quantidade de matéria-prima natural, areia.

A.R.G. Azevedo, (Azevedo et al., 2020) fala da utilização de RCD como agregado nas misturas de argamassa, em alternativa à areia natural, fazendo uma substituição parcial, de 25, 50 e 100% da mesma. Avaliou-se as propriedades como a fluidez da argamassa, resistência mecânica, densidade e absorção de água comparando as argamassas com ambos os agregados.

Os resultados mostraram que o índice de RCD não devia ser superior a 25%, uma vez que acima desta percentagem as argamassas requerem mais água.

Um dos RCD mais comuns é o próprio betão, que por sua vez é constituído por diversos materiais. A separação destes é impraticável, mas após britado e peneirado pode ser utilizado como agregado para fabricar novas argamassas. Contudo a britagem dos RCD traz um problema face à areia natural, a granulometria dos grãos. Enquanto na areia as partículas são homogêneas e circulares, nos RCD são achatadas e bicudas, o que torna mais difícil o processo de peneiração.

Ainda assim, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados é uma solução viável do ponto de vista tecnológico e ambiental, contribuindo para a produção de argamassa limpa (Azevedo et al., 2020).

6.3. Utilização de RCD em argamassa para impressão 3D

Ao serem resíduos processados, os agregados de RCD têm uma composição diferente dos agregados convencionais. Assim as características da argamassa onde forem usados serão diferentes do habitual (GIRARDI, 2020).

Atualmente, a impressão 3D de argamassa desperta interesse em todo o mundo, não só pelas suas vantagens de construção digital, mas também pelos problemas ambientais causados pelos RCD. O objetivo de Shuai Zou e coautores é a criação de uma argamassa de impressão 3D com 100% de areia reciclada, avaliando as suas propriedades de fluidez, extrudabilidade, janela de impressão e resistência (Zou et al., 2021).

A impressão 3D com agregado reciclado atende a todos os requisitos de uma argamassa com areia natural para além de ainda permitir um tempo ótimo de impressão superior ao normal (Teixeira, 2018).

O tijolo é um RCD e tem sido estudado na literatura. M. Adamson analisa (Adamson et al., 2015) o impacto da substituição parcial no betão dos agregados naturais por tijolo triturado. Puderam ser retirados vários resultados desta investigação: i) os agregados de tijolo mostraram maior porosidade e absorvência do que os agregados naturais; ii) o betão com agregados de tijolo teve um aumento na sua *workability*; e iii) os agregados de tijolo mostraram uma ligeira melhoria na sua resistência à compressão.

Neste capítulo provou-se a possibilidade de desenvolvimento de uma argamassa para impressão 3D com resíduos reciclados. Explorar-se-á as vantagens da utilização de alguns destes resíduos para depois se alcançar novas possibilidades estéticas, ao mesmo tempo que se caminha num sentido mais sustentável. Assim no plano experimental serão realizados testes de misturas, cor, *workability*, *extrudability*, e *printability* do material a desenvolver.

7. Pesquisa de Mercado

Após análise de literatura das diferentes tecnologias 3DCP, substituições e reciclagem de materiais nas argamassas cimentícias, deve-se ter em consideração alguns exemplos de projetos reais onde o mesmo aconteceu.

7.1. Victoria Sustainability

No Estado de Victoria, Austrália, estão a ser utilizadas garrafas de vidro recicladas para ajudar a construir estradas. A sustentabilidade com a utilização de vidro partido, geralmente impróprio para reciclagem, é o ingrediente para estas estradas do futuro.

O projeto da autoestrada de Tullamarine, em Melbourne, reutiliza 12.5 milhões de garrafas recicladas em forma de pó misturadas no asfalto. A utilização deste material reduz a utilização de materiais naturais como a areia. Este projeto fez perceber que a reciclagem/reutilização de vidro não precisa de ser feita apenas com a transformação de vidro em vidro, podemos misturá-lo com outros materiais e obter misturas novas que podem contribuir não só para a reciclagem do vidro mas também para a redução de matérias primas finitas (*How Recycled Glass Bottles Are Helping Build Victoria's Roads of the Future*, n.d.).

Esta abordagem é algo significativo em Victoria, uma abordagem chamada Economia Circular. Isto significa que em vez da economia tradicional de comprar, usar e descartar, a economia circular apoia-se no usar e reutilizar. O sistema ganha assim valor ecológico e económico. Neste projeto foram poupados milhares de dólares australianos em 20 km de autoestrada. O caminho seguido pela Austrália é também o que se quer seguir com esta tese, de forma que esteja também ela apoiada num sistema de economia circular (*How Recycled Glass Bottles Are Helping Build Victoria's Roads of the Future*, n.d.).

II. ESTADO DA ARTE



Figura 10 - Sustentabilidade na construção rodoviária e civil no Estado de Victoria, Austrália (adaptada de (How Recycled Glass Bottles Are Helping Build Victoria's Roads of the Future, n.d.))

7.2. Montreal's Darwin Bridge

Um projeto em Darwin, Montreal, utiliza vidro reciclado para a construção de uma ponte.

Aproximadamente 70.000 garrafas de vidro recicladas foram trituradas em pó e misturadas no betão. Um método que já foi usado anteriormente em Montreal, em passeios e pisos.

Contudo em nenhuma parte do mundo foi usado numa ponte.

Segundo o engenheiro de design Étienne Cantin Bellemare, os resultados foram muito bons e o material tem um ótimo desempenho no clima desta cidade canadiana.

O vidro entra em substituição de uma parte do cimento no betão e corresponde a 10% do material usado, o que economiza cerca de 40.000 kg de cimento. Esta alteração tornou a estrutura mais durável, resistente e diminui a pegada ecológica do projeto. O futuro irá agora permitir perceber o desempenho do material ao longo dos anos, sendo que este será objeto de estudo.

Um método desenvolvido em parceria com o SAQ e a Université de Sherbrooke, que pode definir o futuro do betão.

Neste projeto podemos ver que o vidro reciclado também pode substituir o próprio cimento no betão. Este é um caminho interessante, e também muito importante para uma economia circular, contudo o caminho de trocar a areia por pó de vidro na mistura, como foi visto no projeto da autoestrada de Tullamarine, despertou mais entusiasmo. (Montreal's Darwin Bridge Construction Project Uses Recycled Glass - Montreal | Globalnews.Ca, n.d.)

II. ESTADO DA ARTE



Figura 11 - Construção de ponte com 70 mil garrafas de vidro reciclado em Montreal, Canadá (adaptada de (Montreal's Darwin Bridge Construction Project Uses Recycled Glass - Montreal | Globalnews.ca, n.d.))

III. Caso de Estudo

O capítulo anterior, estado de arte, permitiu entender a problemática dos resíduos de demolição e construção e perceber a utilidade que estes podem ter no desenvolvimento de materiais cimentícios. Foram também explorados diferentes tipos de impressão 3D fundamentais para o delinear do caso de estudo.

Neste capítulo pretendeu-se criar um material, apto para impressão 3D, através da utilização de RCD, tendo a opção recaído, designadamente, sobre os seguintes resíduos: vidro; tijolo; betão; azulejo; cortiça negra; poliestireno expandido; carvão e agregado de pneu, plástico e cortiça. O intuito foi substituir totalmente a areia por RCD e, ainda, potenciar a reduzir da quantidade de cimento utilizada.

Para o efeito, foram exploradas diferentes composições de argamassa a partir da integração de RCD na sua mistura.

Numa fase inicial, o material que estava no centro desta experiência era o vidro, devido ao seu valor estético (cor, brilho e transparência) e, também, por ser infinitamente reciclado, como vimos no capítulo anterior, (*Introducing the Glass Hallmark - FEVE*, n.d.). Houve a vontade de estudar o aspeto visual resultante da argamassa final com este RCD.

Primeiramente experimentaram-se duas cores diferentes de cimento (cinza e branco), com a intenção de perceber o impacto na variação cromática da argamassa. Percebeu-se que, por ser escuro, o cimento cinza tornava impercetível o uso de qualquer RCD. Assim, com a escolha do cimento branco, prosseguiu-se para a testagem de vários tipos de RCD e diferentes granulometrias.

Nesta fase, foram testados, para além do vidro, diversos materiais: tijolo, betão, azulejo, cortiça negra, agregado de plástico, pneu e cortiça, poliestireno expandido e carvão. O objetivo principal da introdução de todos estes materiais era perceber a materialidade, cor e textura que cada um deles acrescentava à argamassa final.

Verificaram-se com algumas dificuldades para garantir a adesão do vidro ao cimento. Assim optou-se por experimentar outros RCD e perceber as vantagens e desvantagens de cada um deles, explorando assim diferentes argamassas que permitissem a impressão.

Os testes realizados dividiram-se em testes de *workability*, análise da trabalhabilidade da mistura, *extrudability*, capacidade de extrusão de um filamento de material, *buildability*, sobreposição dos filamentos em camadas e por fim *printability*, capacidade de impressão da argamassa. Todos estes testes foram realizados tendo como pressuposto que o material tinha que ser passível de ser impresso em 3D.

Após a realização de vários testes de *workability*, definiu-se que, neste âmbito, os RCD principais para desenvolvimento do material seriam o vidro, tijolo e betão. Para cada um deles foram realizados testes de *extrudability* e, posteriormente, os testes de *buildability*.

Foram, ainda, efetuados testes granulométricos à areia de tijolo e à areia de betão, pois foram os RCD que demonstraram maior sucesso nos testes de extrusão, face ao vidro.

Neste âmbito, e considerando que apenas um RCD poderia ter seguimento, e ser utilizado no teste de impressão, optou-se pela areia de tijolo e a mistura final ficou constituída por areia de tijolo, cimento branco e água. Esta mistura foi escolhida, pois o tijolo foi o RCD que melhor resultado teve em todos os testes, *workability*, *extrudability* e *buildability* e por ter sido a argamassa desenvolvida que mostrou melhor consistência e, para além disso foi também o RCD que ofereceu uma variação cromática mais interessante através da pigmentação natural alaranjada que o tijolo dá à argamassa seca.

III. Caso de Estudo

Para os testes de *printability* foi necessário, fazer estudos prévios de modelação 3D, pois era necessário adequar a impressão ao material desenvolvido. Para tirar o maior proveito possível do material, decidiu-se fazer um painel customizável, com inspiração nos painéis de Vhils. Os estudos começaram por um painel de autorretrato, para mostrar os benefícios da impressão 3D de argamassa face à utilização de moldes. Foram feitas diferentes modelações, testes e até mesmo impressões em ácido polilático (PLA) a partir desta ideia, mas a falta de detalhe conseguido pela impressora, que impossibilitava a precissão do retrato do painel após impresso, revelou-se uma dificuldade difícil de ser ultrapassada. Ainda sem vontade de desistir da impressão de um painel com o material desenvolvido, tentou-se a modelação de diferentes tipos de painéis geométricos, com inspiração nas fachadas árabes. Esta segunda ideia acabou também por não ter continuidade, dado que o resultado final seria mais facilmente conseguido através de moldes do que por impressão 3D. Considerando o anteriormente referido, e com algum desalento, abandonou-se a ideia do painel e optou-se por uma peça mais simples, com linhas orgânicas, e não passível de se conseguir através de moldes.

A peça impressa teve como inspiração a jarra Alvar Aalto e a sua impressão foi conseguida, com sucesso, através da utilização de uma impressora de 5 eixos. Por fim foi proposta uma aplicação futura, apenas conseguida em PLA, pegando na ideia inicial da criação de um painel.

1. Objetivos

Os objetivos do caso de estudo foram:

- a) Explorar diferentes composições de argamassa através da integração de RCD e variação das quantidades de cimento;
- b) Explorar a capacidade de impressão do material desenvolvido;
- c) Definir características que se destaquem no novo material face, à argamassa tradicional, e que lhe acrescente valor como a criação de uma paleta cromática com a cor natural dos RCD.

Ao longo do plano experimental existiram ainda outros objetivos, mais específicos, que variaram consoante o material e as suas características, designadamente:

- Desenvolvimento de uma argamassa sem utilização de areia natural e com redução significativa da percentagem de cimento utilizado;
- Criação de uma paleta cromática natural da argamassa (através dos diferentes RCD e da perceção da pigmentação conseguida na argamassa);
- Acréscimo de valor no aspeto visual da argamassa, conseguida através do brilho e transparência do vidro.

2. Requisitos

Num processo de 3D Concrete Printing, 3DCP a tecnologia usada e o material escolhido, são determinantes e têm de ser ajustados consoante o método de impressão selecionado (Teixeira, 2018). Há requisitos fundamentais que têm que ser cumpridos para se conseguir uma boa impressão tridimensional estando eles apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos fundamentais de impressão 3D (Almeida & Mpressão, 2021)

FLUIDEZ	TEMPO ÓTIMO	VELOCIDADE DE EXTRUSÃO
<p>Facilidade com que o material sai pelo bocal evitando os chamados “<i>cold joints</i>”. Tal acontece quando há uma interrupção na extrusão do material, levando a que a argamassa seque, dificultando a adesão com a nova camada. Normalmente decorre da composição da mistura que causa entupimento na mangueira da impressora.</p>	<p>Também chamado de “<i>open window</i>”, é o momento em que a extrusão da mistura acontece de forma contínua e sem deformações. Este é o período onde a viscosidade da mistura é exemplar e por norma termina quando a mistura perde água ao ponto de não conseguir mais ser extrudada.</p>	<p>Carece de perfeito controle, quando existir sobreposição de camadas pois a camada que se encontra por baixo não pode estar líquida ao ponto de sofrer deformações com o peso, nem seca ao ponto de dificultar a adesão entre camadas.</p>

Para além dos 3 requisitos fundamentais indicados acima, capacidade de fluidez do material, tempo ótimo de impressão e a velocidade de extrusão, para se alcançar uma boa impressão, há também requisitos a cumprir para se desenvolver uma argamassa apta para impressão. A capacidade de impressão de um material define-se como *printability*, e para a alcançar é necessário que a argamassa possua as seguintes características: *workability*, *extrudability* e *buildability*. Na tabela 3 descreve-se o que se entende essencial e relativamente a cada uma delas

III. Caso de Estudo

Tabela 3 - Requisitos do material para impressão (adaptada de (Teixeira, 2018))

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

Todas estas condições e características serão estudadas e avaliadas ao longo deste capítulo. Uma vez que o objetivo principal é alcançar uma argamassa apta para impressão teve-se maior enfoque nos requisitos de capacidade de impressão, *workability*, *extrudability* e *buildability*. Houve, assim, 3 momentos de testagem antes da impressão, e o maior destaque foi dado a um dos requisitos fundamentais da impressão 3D, a fluidez do material. Uma mistura de material só seguia para a fase seguinte se cumprisse os requisitos mínimos na fase anterior.

Foram testadas diversas misturas, com diferentes RCD e várias granulometrias desses mesmos materiais (anexo A).

3. Metodologia

Para o desenvolvimento deste material foram realizados diversos testes. Todo o processo de experimentação teve por base um método de tentativa erro.

Neste plano experimental, houve vários objetivos que se tentaram alcançar tendo por base a seguinte ordem de trabalho:

1. Testes de dois tipos de cimento (branco e cinza)
2. Testes de *workability*
3. Testes de *extrudability*
4. Testes de *buildability*
5. Produção de areia RCD
6. Testes granulométricos
7. Testes cromáticos

4. Plano Experimental

4.1. Fase 1: Teste dos acabamentos de argamassas com adição de agregados reciclados

Nestes primeiros testes foi utilizado apenas um RCD, o vidro âmbar. Contudo foram usadas duas cores de cimento, branco e cinza, um aglomerante, cal hidráulica, e um agregado, areia. Os ensaios que se seguem, serviram para avaliar o aspeto que a argamassa com adição de vidro poderia ter em diferentes misturas.

Um aspeto a ter em consideração relativamente ao plano experimental é que todo ele foi desenvolvido num ambiente caseiro, com ferramentas adaptadas.

Objetivos

Estes primeiros testes tiveram como objetivo principal a aglomeração de todos os componentes da argamassa e a visibilidade do vidro na amostra após secagem. O foco foi no efeito visual do material. Será que o vidro concede cor, textura ou brilho à argamassa seca?

Metodologia

Foram realizados diversos estudos para aferir o resultado da aplicação dos cacos de vidro na argamassa.

Nestes primeiros testes foram utilizados os seguintes materiais:

- Vidro;
- Areia;
- Cimento, SECIL MAESTRO CINZA CEM II/B-L 32.5N;
- Cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R;
- Cal hidráulica;
- Água.

O processo de tratamento do vidro foi igual para os 3 testes que se seguem:

1. Lavar garrafas de vidro com água e sabão para retirar rótulos e cola (fig. 12);
2. Partir as garrafas (envolvidas num pano) com um martelo;
3. Pesar componentes (fig. 13);
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Colocar desmoldante (vaselina) no molde inox;
6. Verter a mistura para o molde; (fig. 14);
7. Deixar secar ao ar;
8. Desmoldar. (fig. 15).

III. Caso de Estudo



Figura 12 - Lavagem das garrafas



Figura 13 - Pesagem dos componentes



Figura 14 - Mistura no molde



Figura 15 - Desmoldagem

Nestes primeiros testes foram usados cacos de vidro, sem controlo na sua granulometria, para perceber apenas o seu efeito visual na argamassa.

1º TESTE - Trabalhidade com vidro âmbar

Componentes:

- 150g vidro âmbar
- 300g areia
- 50g cimento, SECIL MAESTRO CINZA CEM II/B-L 32.5N
- água

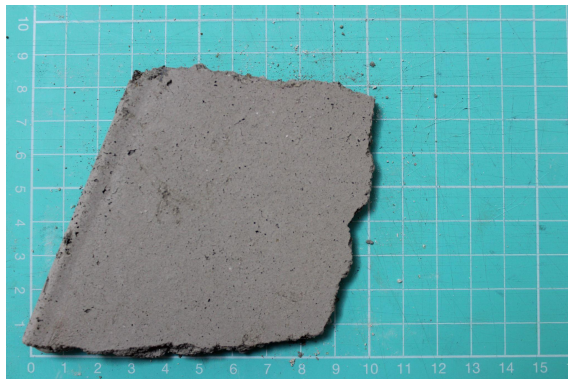


Figura 16 - Teste de amostra com vidro âmbar, cimento cinza e areia - parte de cima



Figura 17 - Teste de amostra com vidro âmbar, cimento cinza e areia - parte de baixo

Com o 1º teste conseguiu-se perceber que, apesar de ter havido aglomeração de todos os componentes, a argamassa é frágil, pois partiu no momento da desmoldação e que o vidro passa totalmente despercebido. Assim, no próximo teste decidiu-se utilizar um ligante, cal hidráulica, para aumentar a resistência e também experimentar o cimento de cor branca para descobrir se o vidro fica mais perceptível.

Para o segundo teste optou-se por diminuir a quantidade de vidro e de areia e ainda introduzir a cal hidráulica, para se perceber, com mais este ligante, se a amostra ficava mais resistente e não partia ao desmoldar.

III. Caso de Estudo

2º TESTE - Trabalhidade com vidro âmbar

Componentes:

- 50g vidro âmbar
- 250g areia
- 50g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 50g cal hidráulica
- água



Figura 18 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia, cimento branco e cal hidráulica – parte de cima



Figura 19 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia, cimento branco e cal hidráulica – parte de baixo

Neste 2º teste houve novamente aglomeração de todos os componentes, mas mesmo com a introdução do ligante a argamassa partiu ao desmoldar. O vidro continuou a passar despercebido. No próximo teste voltou a utilizar-se o cimento branco, mas desta vez sem a cal hidráulica, que o escurece devido à sua cor acinzentada.

Aumentou-se a quantidade de vidro e substituiu-se o cimento cinza por cimento branco. O objetivo principal destas alterações era tornar o vidro visível na argamassa seca.

3º TESTE - Trabalhidade com vidro âmbar

Componentes:

- 200g vidro âmbar
- 100g areia
- 100g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- água

III. Caso de Estudo



Figura 20 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia e cimento branco – parte de cima



Figura 21 - Teste de amostra com vidro âmbar, areia e cimento branco – parte de baixo

No 3º teste, mais uma vez, houve aglomeração de todos os componentes, mas a amostra voltou a partir ao desmoldar. O vidro neste teste é ligeiramente visível e conclui-se que foi da utilização exclusiva do cimento branco. Pensa-se que o vidro pode ser ainda mais nítido se substituir, na totalidade, a areia da argamassa.

III. Caso de Estudo




Avaliação e conclusão

Após os 3 testes apenas foi alcançado um objetivo, a aglomeração dos componentes na argamassa seca. Ainda assim as amostras revelaram-se frágeis ao desmoldar, o que levou a que todas elas partissem neste processo. O vidro passou despercebido em todas as amostras, apesar de ficar mais visível quando misturado com cimento branco.

Com base nestas conclusões, foram definidos alguns pontos principais de melhoria para os testes seguintes:

- Ausência total de areia na argamassa de forma a dar completo destaque ao vidro;
- Controlar a dimensão do agregado de vidro, de forma a ter a maior dimensão possível, tendo em consideração o bocal da impressora 3D (4 mm);
- Inclusão de outros materiais, em substituição do vidro, como azulejos e tijolos, por serem resíduos de construção e demolição;
- Utilização apenas de cimento de cor branca para se destacar o agregado novo.

Tabela 4 - Resultados Testes Fase 1

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
1	Vidro Âmbar	Cacos	
2	Vidro Âmbar	Cacos	
3	Vidro Âmbar	Cacos	

III. Caso de Estudo

4.2. Fase 2: Teste dos acabamentos de argamassas apenas com agregados reciclados de granulometria 3-4 mm

Estes testes, pretendem avaliar o aspeto estético do acabamento do material. Foram usados, para além do vidro, tijolo e azulejo como material reciclado a introduzir na mistura. Uma vez que nos testes anteriores os RCD passaram despercebido em todas as amostras, (apesar do vidro ficar mais exposto quando misturado com cimento branco), nesta fase o objetivo é controlar a granulometria dos 3 RCD diferentes e utilizar apenas cimento branco para ser mais fácil identificar o substituto da areia. Desta forma são esperados melhores resultados a nível estético que na fase anterior.

Objetivos

Nestes ensaios trabalhou-se com 3 RCD diferentes (vidro, tijolo e azulejo) e pretende-se perceber quais as vantagens e desvantagens de cada um deles. Foram testados 3 materiais diferentes para perceber a reação de cada um na argamassa. Tratam-se de testes com diversos resíduos de construção, em que a única coisa comum é a granulometria dos cacos, 3-4 mm. Os objetivos mantiveram-se praticamente iguais aos da primeira fase, uma vez que estes não foram alcançados, aglomeração de todos os componentes da argamassa, visibilidade do vidro na amostra seca e estética do material, perceber se o vidro concede cor, textura ou brilho à argamassa seca.

Metodologia

Foram utilizados os seguintes materiais:

- Vidro;
- Tijolo;
- Azulejo;
- Cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R;
- Água.

Vidro

O processo de tratamento do vidro foi idêntico ao dos testes anteriores:

1. Lavar as garrafas de com água e sabão para retirar rótulos, cola e sujidade;
2. Partir as garrafas (envolvidas num pano) com um martelo (fig. 22);
3. Peneirar o material em cacos, granulometria entre 3-4 mm (fig. 23);
4. Pesquisar componentes;
5. Misturar os componentes com uma colher;
6. Colocar desmoldante (vaselina) no molde;
7. Verter a mistura para o molde (fig. 24);
8. Deixar secar ao ar;
9. Desmoldar (fig. 25).

III. Caso de Estudo



Figura 22 - Partir as garrafas com auxílio de um martelo



Figura 23 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4 mm



Figura 24 - Verter mistura no molde



Figura 25 - Desmoldar

Para o quarto teste optou-se por usar 75% de vidro, numa percentagem de sólidos, retirar por completo a areia natural e usar cimento branco para “garantir” que o RCD seria visível na argamassa seca.

4º TESTE - Trabalhadade com vidro verde, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 33g vidro verde
- 11g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 7ml água

Rácio de sólidos:

- 75% RCD
- 25% Cimento



Figura 26 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4 mm – parte de cima



Figura 27 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4 mm – parte de baixo

No 4º teste, não só houve aglomeração de todos os componentes, como foi o primeiro teste em que a amostra não quebrou ao desmoldar. Ao substituir na totalidade a areia natural por vidro e utilizando apenas cimento branco conseguiu-se os resultados esperados para esta fase. O vidro é visível na argamassa seca, de ambos os lados da amostra, e dá à mesma textura. O mesmo teste irá ser replicado com azulejo e tijolo.

III. Caso de Estudo

Azulejo

Após o teste de vidro, testou-se o azulejo. O processamento deste material foi idêntico ao do vidro:

1. Lavar os azulejos com água e sabão para retirar a sujidade;
2. Partir os azulejos (envolvidos num pano) com um martelo (fig. 28);
3. Peneirar o material em cacos, granulometria entre 3-4 mm (fig. 29);
4. Pesar componentes;
5. Misturar os componentes com uma colher;
6. Colocar desmoldante (vaselina) no molde;
7. Verter a mistura para o molde (fig. 30);
8. Deixar secar ao ar;
9. Desmoldar (fig. 31).



Figura 28 - Partir os azulejos com auxílio de um martelo



Figura 29 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4 mm



Figura 30 - Verter a mistura no molde



Figura 31 - Desmoldar

Neste teste foram usados azulejos que não puderam ser utilizados numa obra, pois estavam partidos, fazendo jus à utilização de RCD na argamassa. Na fase de tratamento do azulejo foi logo possível notar alguma dificuldade a trabalhar o mesmo, pois foi um RCD bastante difícil de partir com o martelo e, também, de peneirar num tamanho de grão tão pequeno como 3-4 mm.

Para o quinto teste, teve-se por base os resultados do teste anterior, optou-se por usar 67% de azulejo, com uma granulometria de 3-4 mm e apenas usar cimento branco.

5º TESTE - Trabalhidade com azulejo, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 12g azulejo
- 6g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 6ml água

Rácio de sólidos:

- 67% RCD
- 33% Cimento

III. Caso de Estudo

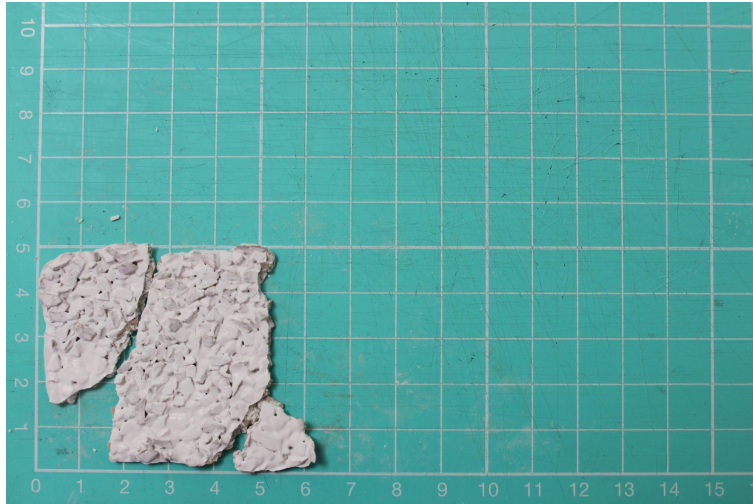


Figura 32 - Teste de amostra com azulejo de granulometria 3-4 mm

Depois da dificuldade sentida no manuseamento do material, o 5º teste apesar de ter aglomerado todos os componentes, a amostra partiu ao desmoldar. Contudo conseguiu ver-se que o azulejo não acrescentava nada, a nível visual, à argamassa a não ser textura. Foi um material que após este teste foi posto de parte.

Tijolo

Após o teste de azulejo, testou-se o tijolo. O processamento deste material foi idêntico ao do vidro e azulejo:

1. Partir os tijolos (envolvidos num pano) com um martelo;
2. Peneirar o material em cacos, granulometria entre 3-4 mm (fig. 33);
3. Pesar componentes (fig. 34);
4. Misturar os componentes com uma colher (fig. 35);
5. Colocar desmoldante (vaselina) no molde;
6. Verter a mistura para o molde (fig. 36);
7. Deixar secar ao ar;
8. Desmoldar.



Figura 33 - Peneirar os cacos, granulometria 3-4 mm



Figura 34 - Pesar os componentes



Figura 35 - Misturar os componentes



Figura 36 - Verter mistura no molde

III. Caso de Estudo

Neste teste foram usados tijolos novos, pois não se conseguiu ter acesso a sobras de resíduos do mesmo, contudo a nível de manuseamento o tijolo foi, até então, o RCD mais fácil de partir e, também, de misturar com o cimento.

Para o sexto teste, mais uma vez teve-se em consideração os resultados dos testes anterior desta fase, foram usados 74% de tijolo, granulometria de 3-4 mm, e cimento branco.

6º TESTE - Trabalhidade com tijolo, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 28g tijolo
- 10g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 7ml água

Rácio de sólidos:

- 74% RCD
- 26% Cimento

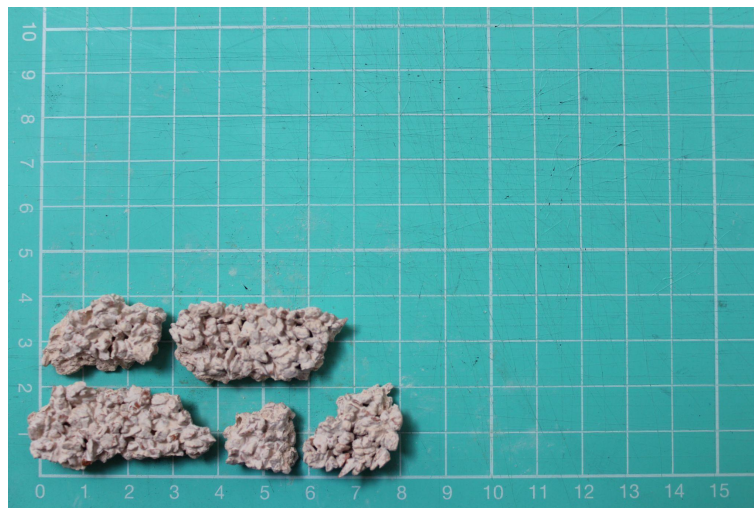


Figura 37 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4 mm

No 6º teste houve aglomeração de todos os componentes, mas a amostra voltou a partir ao desmoldar. Este desfecho podia ter sido justificação para pôr de parte este material, mas a amostra revelou demasiado interesse a nível de cor. Mesmo com, apenas, pequenos pedaços de argamassa, foi possível ver o pigmento alaranjado que o tijolo lhe dava, assim decidiu-se explorar mais este RCD.


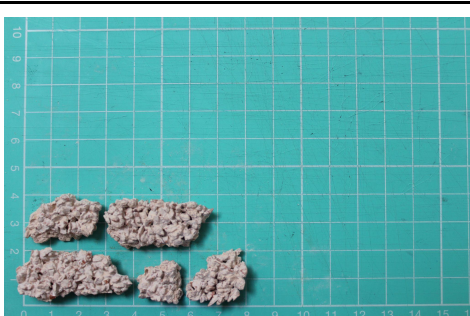
III. Caso de Estudo

Avaliação e conclusão

Sem dúvida que o teste que teve melhores resultados foi o 4º, pois todos os componentes da argamassa ficaram bem ligados, sendo fácil a identificação do vidro na amostra seca. O 5º teste foi o que adicionou menor valor, pois além do azulejo ser um material difícil de trabalhar (partir e peneirar) não se realça na argamassa.

O 6º teste, embora evidencie pouca resistência, pois partiu no momento da desmoldação, deixou alguma curiosidade pela cor característica que o tijolo deixou na argamassa. Sendo a estética do material um objetivo constante ao longo de todos os testes desenvolvidos, passou-se a uma nova fase de testes com foco na capacidade de extrusão do material, para que este possa ser impresso em 3D. As experiências que se seguem pretendem simular a extrusão de um filamento de argamassa.

Tabela 5 - Resultados Testes Fase 2

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
4	Vidro Verde	3-4 mm	
5	Azulejo	3-4 mm	
6	Tijolo	3-4 mm	

III. Caso de Estudo

4.3. Fase 3: Teste da extrusão das argamassas

Estes testes serviram para perceber a capacidade de extrusão das misturas desenvolvidas, isto é, a capacidade que o material tem de passar por um orifício através de uma força exercida e ficar com um formato alongado.

Objetivos

O objetivo principal foi a extrusão da argamassa, para além disso manteve-se o objetivo de aglomeração de todos os componentes e ser possível visualizar o vidro na amostra seca. A simulação de extrusão de filamento foi feita primeiramente através de uma pistola de silicone e depois por um tubo de pasteleiro.

O acabamento do material continua a ser o foco desta investigação. Nesta fase de testes pretende-se perceber se é possível dar cor ou textura ao cordão após extrusão. As misturas desenvolvidas nesta etapa não foram tão exploratórias como as anteriores. Com a aprendizagem dos primeiros testes já se percebe mais sobre a trabalhabilidade do material e a consistência que este deve adquirir, *workability*. Tenciona-se testar a *extrudability* do material, bem como a sua fluidez, o tempo ótimo de impressão, de forma a cumprir os requisitos fundamentais para uma boa impressão e garantir uma argamassa imprimível.

Metodologia

Foram realizadas amostras com diferentes cores de e granulometrias e diferentes espessuras de cordão. Os primeiros testes foram desenvolvidos com um tubo (com abertura de 1 cm) e pistola de silicone previamente vazia e limpa.

Os materiais utilizados foram:

- Vidro;
- Tijolo;
- Aglomerado de pneu, plástico e cortiça;
- Cortiça negra;
- Poliestireno expandido;
- Carvão;
- Cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R;
- Água.

III. Caso de Estudo

Vidro

Assim como nos testes anteriores, o processo do vidro foi idêntico:

1. Lavar as garrafas com água e sabão, para retirar rótulos, cola e sujidade;
2. Partir as garrafas, envolvido num pano, com um martelo;
3. Peneirar o material (fig. 38);
4. Pesar componentes (fig. 39);
5. Misturar os componentes com uma colher (fig. 40);
6. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro (fig. 41);
7. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura.



Figura 38 - Peneirar os cacos



Figura 39 - Pesar os componentes



Figura 40 - Misturar os componentes



Figura 41 - Verter mistura para o tubo de silicone

7º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 80g vidro verde
- 27g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 14ml água

Rácio de sólidos:

- 75% RCD
- 25% Cimento

O teste de extrusão falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material.

Para o oitavo teste decidiu-se usar uma granulometria inferior a 3 mm, mas manteve-se os 75% de RCD, para ver se desta forma já seria possível extrudir a mistura.

III. Caso de Estudo

8º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria <3 mm

Componentes:

- 100g vidro verde
- 33g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 25ml água

Rácio de sólidos:

- 75% RCD
- 25% Cimento

Este teste, também não resultou, uma vez que não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.



Figura 42 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 3 mm – parte de cima

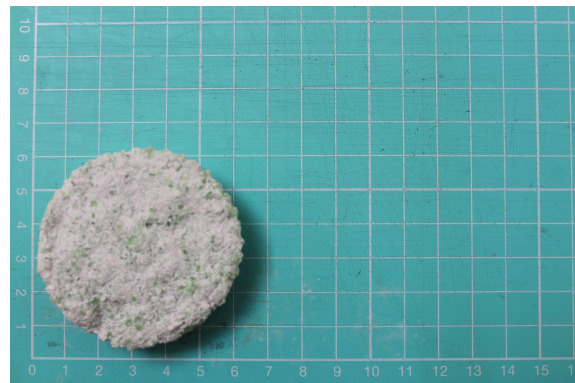


Figura 43 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 3 mm – parte de baixo

Com o teste de amostra do 8º teste conseguiu-se facilmente identificar o vidro na argamassa, de ambos os lados da amostra, e também é perceptível uma textura areada na mesma.

Para o nono teste, usou-se vidro em pó, granulometria inferior a 1 mm, pois nos dois testes anteriores ainda não se tinha conseguido simular a extrusão. Manteve-se os 75% de RCD, para manter a coerência ao longo destes 3 testes.

9º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria <1 mm

Componentes:

- 55g vidro verde
- 18g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 12ml água

Rácio de sólidos:

- 75% RCD
- 25% Cimento

Este teste, também foi um insucesso, uma vez que não foi possível extrudir o material.

III. Caso de Estudo

Conclusões

Nenhum destes últimos 3 testes correu como era esperado uma vez que não se conseguiu simular a extrusão de material através da pistola e tubo de silicone. Na tentativa de conseguir extrudir, de teste para teste, foi-se reduzindo a granulometria do vidro, mas esta não foi possível. A única conclusão que se conseguiu retirar foi relativa à consistência do material, sendo o vidro um material “liso”; “polido” não agarra bem ao cimento o que faz com que a mistura fique demasiado escorregadia e aguada.

O objetivo nos próximos testes será aumentar a quantidade de cimento para obtermos um rácio de 50/50 entre vidro e cimento, para tentar que o material adquira uma consistência mais próxima da que será necessária para impressão. Serão continuados os testes de simulação de extrusão, desta vez com um tubo de pasteleiro com abertura de 2 cm. Para além do novo rácio entre materiais, voltaram a ser utilizados outros desperdícios de resíduos de construção como: tijolo, carvão, cortiça, poliestireno expandido, entre outros.

Para o décimo teste, decidiu-se começar pela utilização do vidro em pó e optou-se por reduzir ligeiramente a percentagem de vidro para os 67%.

10º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria <1 mm

Componentes:

- 60g vidro verde
- 30g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 30ml água

Rácio de sólidos:

- 67% RCD
- 33% Cimento

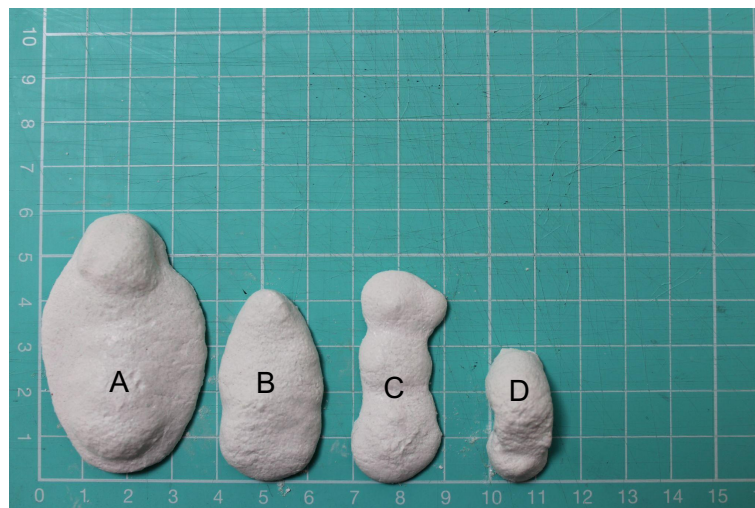


Figura 44 - Filamento teste de extrusão com vidro verde de granulometria < 1 mm

Neste teste vê-se, pela primeira vez, a extrusão do material. Foi possível simular-se a impressão, com o tubo de pasteleiro, de 4 amostras de material. Na evolução dos filamentos conseguimos perceber que A, B e C estão demasiado espalmados, apesar de ser visível a redução do excesso de água do A para o C, e que o D é, sem dúvida, o que mostra melhor consistência e aspeto de filamento impresso. Podemos assim considerar que o tempo ótimo de impressão se deu durante a extrusão do filamento D.

III. Caso de Estudo

Este teste de extrusão com vidro verde de granulometria <1 mm, correu bem, uma vez que houve extrusão do material pelo bocal do tubo de pasteleiro, e como houve sobra de material foi possível fazer teste de amostra do material.

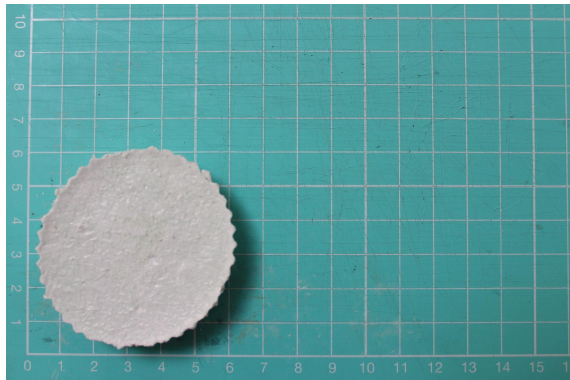


Figura 45 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 1 mm – parte de cima

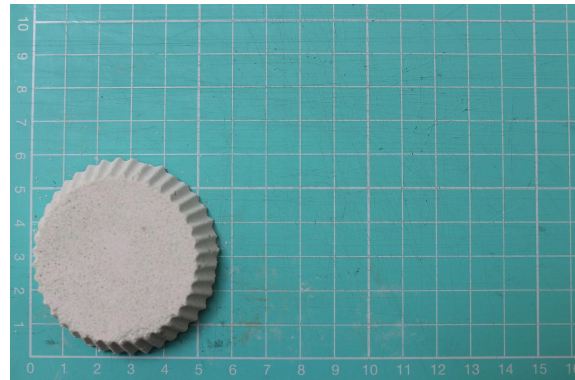


Figura 46 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 1 mm – parte de baixo

Uma vez que foi usada uma granulometria inferior à do teste anterior, na amostra do 10º teste não se consegue identificar, tão facilmente, o vidro na argamassa, apesar de ser possível ver algum brilho, pigmento verde na parte de baixo da amostra.

Uma vez que já foi possível simular a extrusão utilizando 67% de vidro em pó, para o décimo primeiro teste, utilizou-se vidro com uma granulometria entre 3-4 mm, reduzindo ligeiramente a sua percentagem, de 67% para 60%.

11º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 60g vidro verde
- 40g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 20ml água

Rácio de sólidos:

- 60% RCD
- 40% Cimento

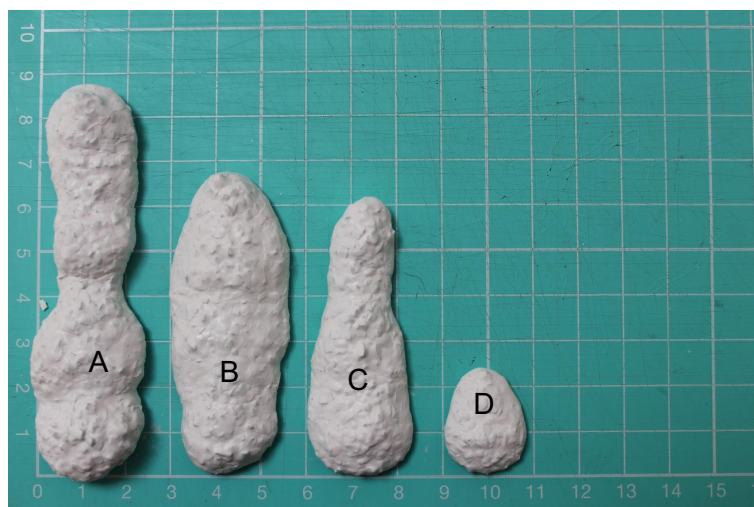


Figura 47 - Filamento teste de extrusão com vidro verde de granulometria 3-4 mm

III. Caso de Estudo

Conseguiu-se simular a impressão de 3 filamentos de material. No filamento A consegue-se ver um excesso de água presente no início da extrusão, em B a consistência é mantida ao longo de toda a amostra, C mostra perda de água no final do filamento o que demonstra o final da *open window* de impressão, o que fica provado que em D já não é possível extrudir filamento. Consegue-se também ver que o excesso de água torna a espessura dos filamentos maiores, pois abatem. Idealmente, com este bocal a espessura do filamento seria 2 cm, mas como podemos ver na figura 47 é quase 3 cm.

O 11º teste, teste de extrusão com vidro verde de granulometria 3-4 mm, correu bem, uma vez que houve extrusão do material pelo bocal do tubo de pasteleiro, e como houve sobra de material foi possível fazer teste de amostra do material.

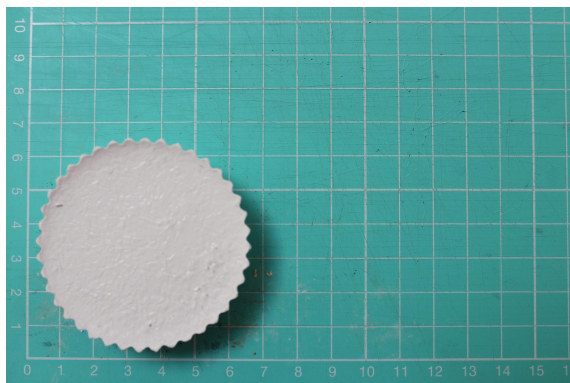


Figura 48 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4 mm – parte de cima

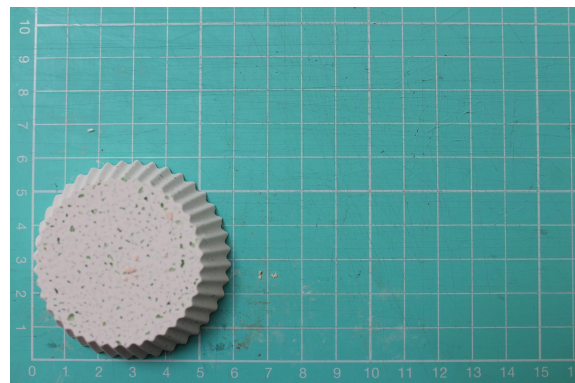


Figura 49 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria 3-4 mm – parte de baixo

Consegue-se identificar cacos de vidro na parte de baixo da amostra, os quais dão uma sensação de luminosidade à argamassa.

Para o décimo segundo teste decidiu-se experimentar uma granulometria de vidro mais abrangente, inferior a 4 mm, e usar uma percentagem de vidro menor, 50%.

III. Caso de Estudo

12º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria <4 mm

Componentes:

- 25g vidro verde
- 25g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 12ml água

Rácio de sólidos:

- 50% RCD
- 50% Cimento

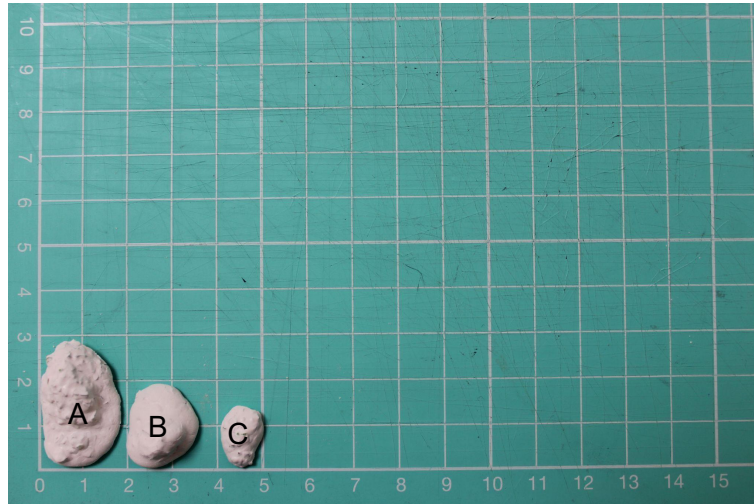


Figura 50 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria < 4 mm

Neste teste percebeu-se que a diminuição da quantidade de água teve impacto na extrusão do material uma vez que o tempo ótimo de impressão foi quase inexistente. A falta de água fez com que não fosse possível extrudir um filamento, notando-se que de A a C foi cada vez menor a quantidade de material que se conseguia extrair do bocal.

Como praticamente não existiu extrusão, houve sobra de material e foi possível fazer teste de amostra.

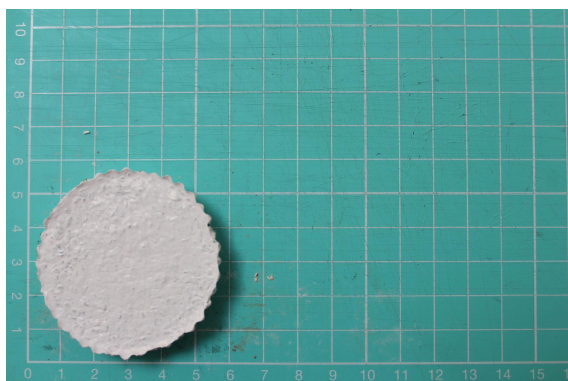


Figura 51 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 4 mm – parte de cima

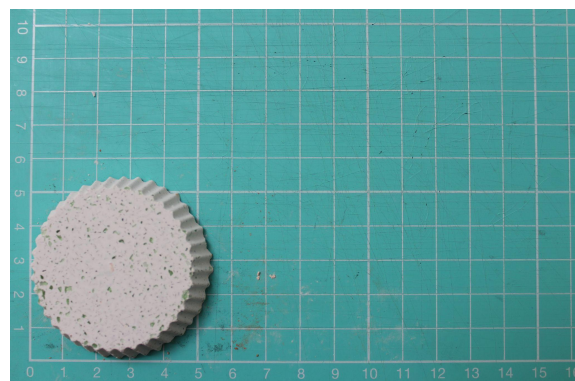


Figura 52 - Teste de amostra com vidro verde de granulometria < 4 mm – parte de baixo

III. Caso de Estudo

É facilmente identificável a presença de cacos de vidro na parte de baixo da amostra que dão uma sensação de luminosidade à argamassa.

Tendo o teste anterior com base, para o décimo terceiro teste usou-se na mesma uma granulometria de vidro inferior a 4 mm, mas em menor percentagem, 40%.

13º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria 3-4 mm

- 20g vidro verde
- 30g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio de sólidos:

- 40% RCD
- 60% Cimento

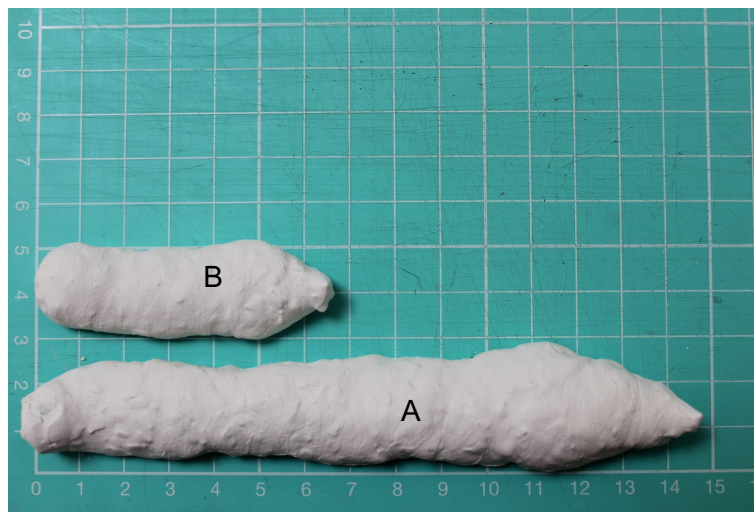


Figura 53 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria 3-4 mm

Depois do teste anterior tentou fazer-se um ajuste nas quantidades dos materiais e como se pode ver pela figura 53, a extrusão do material do 13º teste gerou o filamento mais longo (15 cm). O filamento A denota um pouco de água a mais no início (direita para esquerda) mas de todas as extrusões foi a que obteve melhores resultados a nível de consistência. Infelizmente a cor do vidro não é visível na argamassa seca, mas é perceptível a textura do mesmo.

Para perceber se se conseguia um filamento mais estreito neste teste usou-se uma granulometria de vidro entre os 2-3 mm mas numa percentagem bem mais reduzida que nos testes anteriores, 25%

III. Caso de Estudo

14º TESTE - Extrusão com vidro verde, granulometria 2-3 mm

Componentes:

- 18g vidro verde
- 53g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 27ml água

Rácio de sólidos:

- 25% RCD
- 75% Cimento

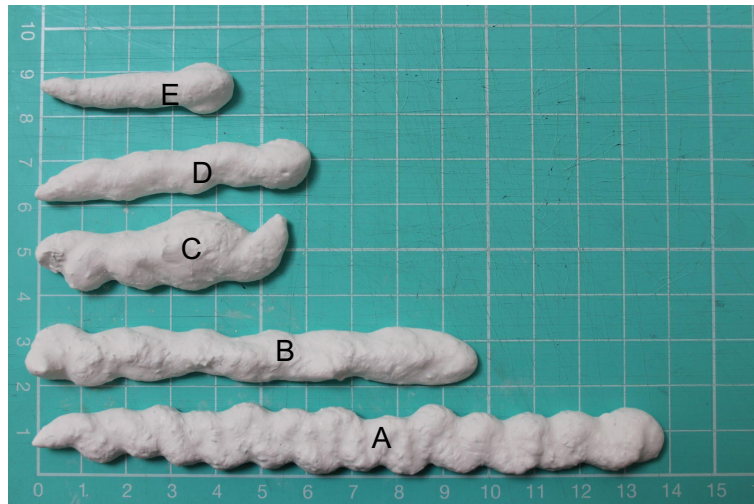


Figura 54 - Filamento Teste de extrusão com vidro verde de granulometria 2-3 mm

No seguimento, do ajuste das quantidades de materiais do 13º teste, decidiu-se no 14º teste reduzir ligeiramente o tamanho do grão de vidro utilizado. É possível ver que todos os filamentos têm uma consistência uniforme, que a redução do grão permitiu a extrusão de filamentos mais estreitos e que a fluidez do material se manteve igual em todos os 5 filamentos. Continua a não ser visível a cor ou brilho do vidro, mas é perceptível a textura do mesmo.

III. Caso de Estudo

Tijolo

Assim como os testes passados com tijolo o processo de tratamento deste material foi:

1. Partir os tijolos, envolvido num pano, com um martelo;
2. Peneirar o material (fig. 55);
3. Pesar componentes (fig. 56);
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro (fig. 57);
6. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura (fig. 58).



Figura 55 - Peneirar os cacos



Figura 56 - Pesar os componentes



Figura 57 - Verter mistura para o tubo de pasteleiro

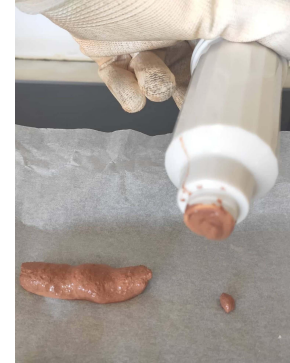


Figura 58 - Extrair a mistura

15º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 70g tijolo
- 35g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 35ml água

Rácio de sólidos:

- 67% RCD
- 33% Cimento



Figura 59 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria < 1 mm

III. Caso de Estudo

Neste teste vê-se que o tempo ótimo de impressão acontece logo entre as amostras A e B. Apesar de no início do filamento A existir ainda um ligeiro excesso de água, o resto da extrusão acontece com ótima viscosidade do mesmo. Já o filamento C e D demonstram o fim da *open window* para esta mistura. É possível ver, de forma direta, a cor alaranjada que o tijolo é capaz de criar com o cimento branco.

O 15º teste, teste de extrusão com tijolo de granulometria <1 mm, correu bem, uma vez que houve extrusão do material pelo bocal do tubo de pasteleiro, e como houve sobra de material foi possível fazer teste de amostra do material.

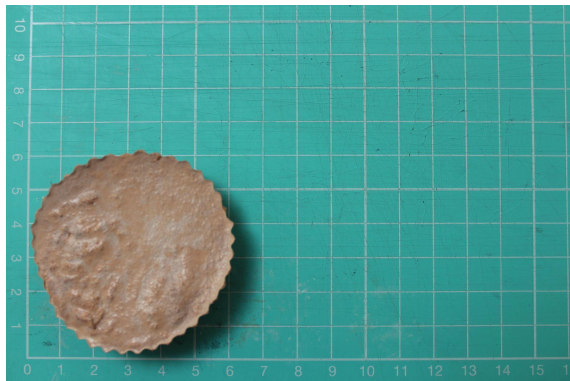


Figura 60 - Teste de amostra com tijolo de granulometria < 1 mm – parte de cima

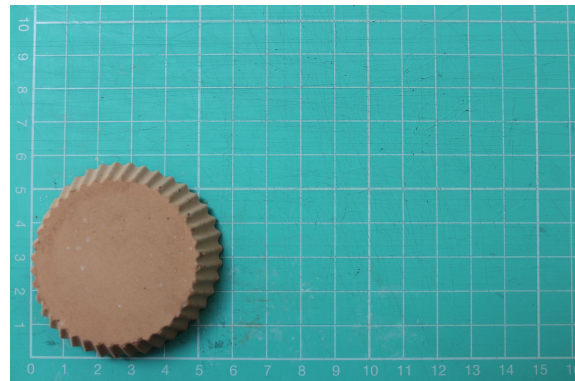


Figura 61 - Teste de amostra com tijolo de granulometria < 1 mm – parte de baixo

É facilmente identificável a pigmentação alaranjada que o tijolo dá à argamassa seca, como já tinha sido possível ver anteriormente nos filamentos da mesma mistura.

16º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 30g tijolo
- 60g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio de sólidos:

- 33% RCD
- 67% Cimento

III. Caso de Estudo

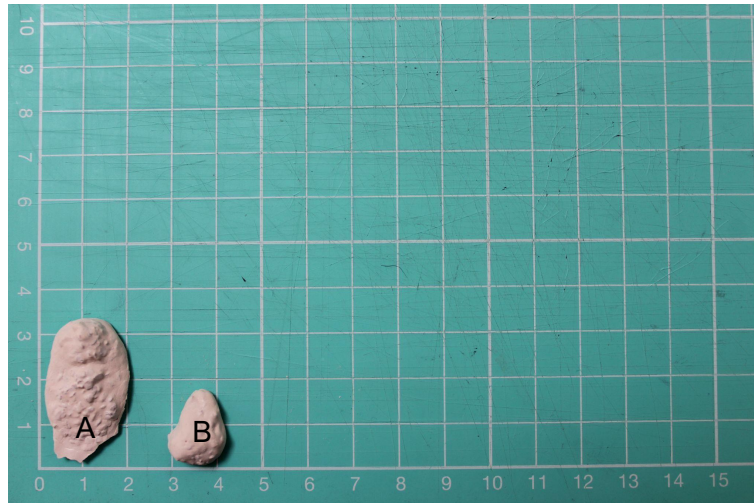


Figura 62 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria 3-4 mm

Neste teste percebeu-se que a falta de água fez com que quase não fosse possível extrudir o material, notando-se que o filamento A revela ainda alguma cor e textura do tijolo, mas a amostra B apenas marca o fim da *open window*.

No 16º teste, teste de extrusão com tijolo de granulometria 3-4 mm, como praticamente não existiu extrusão, houve sobra de material e foi possível fazer teste de amostra.

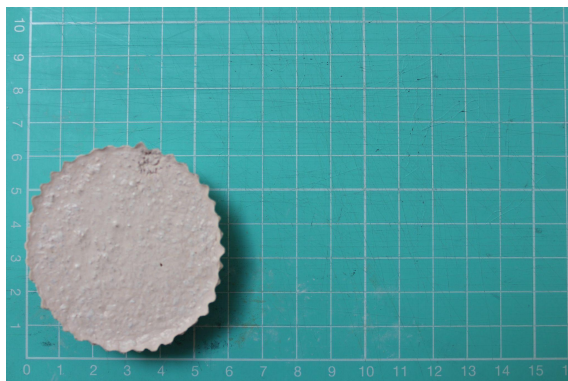


Figura 63 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4 mm – parte de cima

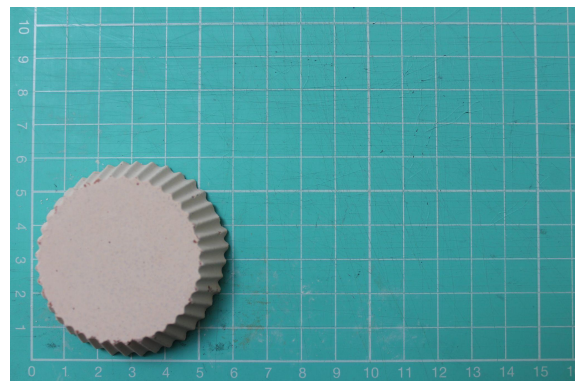


Figura 64 - Teste de amostra com tijolo de granulometria 3-4 mm – parte de baixo

É facilmente detetável a pigmentação alaranjada que o tijolo dá à argamassa seca, apesar de ser mais suave que no teste anterior. A textura do tijolo, apenas é visível na parte de cima da amostra.

17º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria 3-4 mm

- 15g tijolo
- 30g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 10ml água

Rácio de sólidos:

- 33% RCD
- 67% Cimento

III. Caso de Estudo



Figura 65 - Filamento Teste de extrusão com tijolo de granulometria 3-4 mm

Depois do teste anterior tentou ajustar-se as quantidades dos materiais e como se pode ver pela figura 65 a extrusão do material, gerou o filamento mais longo, que tem uma consistência e fluidez uniforme. A cor do tijolo não é visível na argamassa seca, mas é perceptível alguma textura do mesmo.

Conclusões

Com todos os testes de extrusão, com vidro e tijolo, feitos até aqui, foi possível concluir que a extrusão de filamentos de argamassas com estes dois RCD era possível. Assim decidiu-se experimentar ainda mais 4 RCD diferentes (agregado de pneu, cortiça e plástico, cortiça negra, poliestireno expandido e carvão) antes de se passar para os testes de *buildability*. Nestes testes o processo de tratamento dos materiais foi um pouco diferente.

Aglomerado de pneu, plástico e cortiça

Para este aglomerado o processo de tratamento deste material foi diferente:

1. Rasgar em pedaços o material;
2. Triturar o material;
2. Peneirar o material;
3. Pesar componentes;
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro;
6. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura.

18º TESTE - Extrusão com aglomerado de pneu, plástico e cortiça, granulometria <4 mm

Componentes:

- 11g de material (aglomerado de pneu, plástico e cortiça)
- 6g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 6ml água

Rácio de sólidos:

- 65% RCD
- 35% Cimento

III. Caso de Estudo

Este teste falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.

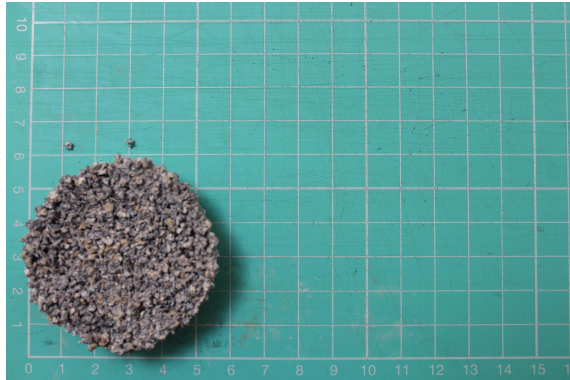


Figura 66 - Teste de amostra com material (aglomerado de pneu, plástico e cortiça) de granulometria < 4 mm – parte de cima



Figura 67 - Teste de amostra com material (aglomerado de pneu, plástico e cortiça) de granulometria < 4 mm – parte de baixo

Consegue-se facilmente identificar o aglomerado de materiais em ambos os lados da amostra e é perceptível uma textura na argamassa, contudo a aglomeração dos materiais não parece a ideal. Os grãos de RCD parecem demasiado soltos na parte de cima da amostra e o cimento parece ter ficado alojado na parte de baixo da amostra. Assim este material foi posto de parte após este teste.

Cortiça Negra

Para a cortiça o processo de tratamento do material foi igual ao do teste anterior com aglomerado de pneu, plástico e cortiça:

1. Partir a cortiça em pedaços;
2. Triturar o material;
2. Peneirar o material;
3. Pesar componentes;
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro;
6. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura.

19º TESTE - Extrusão com cortiça negra, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 5g de cortiça negra
- 5g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 5ml água

Rácio de sólidos:

- 50% RCD
- 50% Cimento

Não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.

III. Caso de Estudo

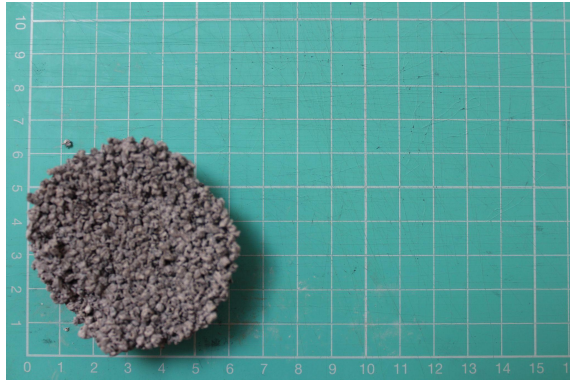


Figura 68 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria 3-4 mm – parte de cima

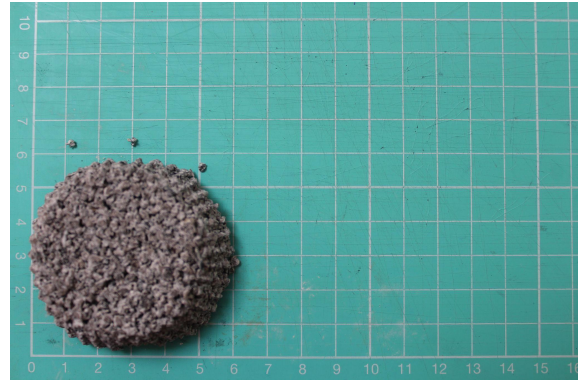


Figura 69 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria 3-4 mm – parte de baixo

Nota-se uma aglomeração insuficiente dos materiais, dando a sensação de que os grãos de cortiça estão desagregados. Ainda assim consegue-se facilmente identificar o cortiça negra e a sua textura em ambos os lados da amostra.

20º TESTE - Extrusão com cortiça negra, granulometria <1 mm

Componentes:

- 7g de cortiça negra
- 4g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 7ml água

Rácio de sólidos:

- 64% RCD
- 36% Cimento

Não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.



Figura 70 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria < 1 mm – parte de cima



Figura 71 - Teste de amostra com cortiça negra de granulometria < 1 mm – parte de baixo

Apesar do teste anterior não ter corrido como esperado decidiu testar-se novamente a cortiça, mas com uma granulometria inferior. É possível ver que face ao 19º teste este mostra melhor aglomeração dos materiais, mais pigmento na argamassa e ainda alguma

III. Caso de Estudo

textura. Contudo uma vez que em nenhum dos testes houve extrusão, este material foi desconsiderado.

Poliestireno expandido

Para este material o processo de tratamento foi idêntico à cortiça:

1. Partir o poliestireno expandido em pedaços;
2. Triturar o material;
2. Peneirar o material;
3. Pesar componentes;
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro;
6. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura.

21º TESTE - Extrusão com poliestireno expandido, granulometria <4 mm

Componentes:

- 1g de poliestireno expandido
- 15g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 10ml água

Rácio de sólidos:

- 6% RCD
- 94% Cimento

Não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.

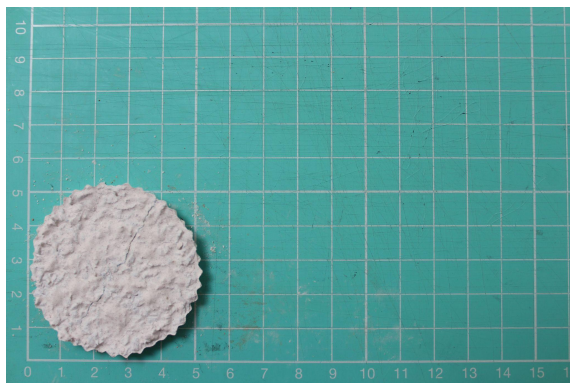


Figura 72 - Teste de amostra com poliestireno expandido de granulometria < 4 mm – parte de cima

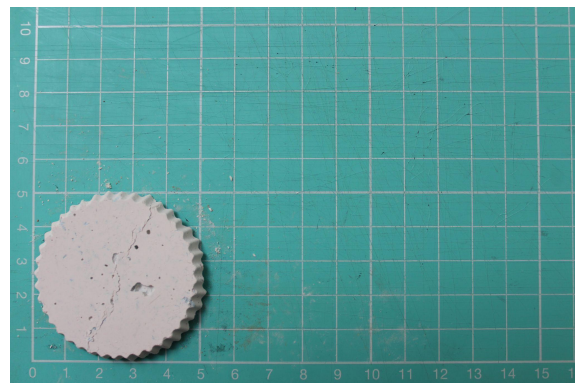


Figura 73 - Teste de amostra com poliestireno expandido de granulometria < 4 mm – parte de baixo

Ao longo do 21º teste foram sentidas diversas dificuldades, começando pelo manuseamento do material, que devido à sua leveza dificultou o processo de mistura e fez com que esta amostra tivesse uma percentagem muito reduzida de RCD. Assim, como se pode ver na figura 72 e 73, apesar de ter havido aglomeração de todos os componentes, a amostra partiu ao desmoldar, não houve ação por parte do poliestireno expandido e a sua textura pouco acrescenta à argamassa final. Assim foi um material que após este teste foi posto de parte.

III. Caso de Estudo

Carvão

No caso do carvão o processo de tratamento do material foi idêntico ao do tijolo:

1. Partir os pedaços de carvão, envolvidos num pano, com um martelo;
2. Peneirar o material;
3. Peser componentes;
4. Misturar os componentes com uma colher;
5. Verter a mistura para o tubo de silicone/tubo de pasteleiro;
6. Fazer pressão sobre o tubo para extrair a mistura.

22º TESTE - Extrusão com carvão, granulometria 3-4 mm

Componentes:

- 12g de carvão
- 24g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 24ml água

Rácio de sólidos:

- 33% RCD
- 67% Cimento

Não foi possível extrudir o material, mas como houve sobra de material foi possível realizar teste de amostra do material.

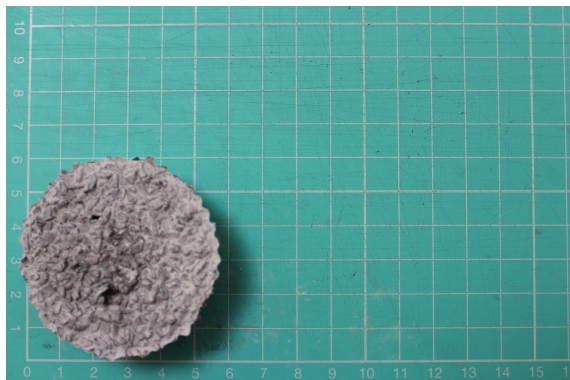


Figura 74 - Teste de amostra com carvão de granulometria 3-4 mm – parte de cima



Figura 75 - Teste de amostra com carvão de granulometria 3-4 mm – parte de baixo

No 22º teste consegue-se facilmente identificar o carvão na argamassa pelo pigmento escuro e pela textura que este deixa na argamassa seca, contudo o cimento parece ter ficado alojado, maioritariamente, na parte de baixo da amostra.

III. Caso de Estudo

23º TESTE - Extrusão com carvão, granulometria <1 mm

Componentes:

- 20g carvão
- 10g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 40ml água

Rácio de sólidos:

- 67% RCD
- 33% Cimento

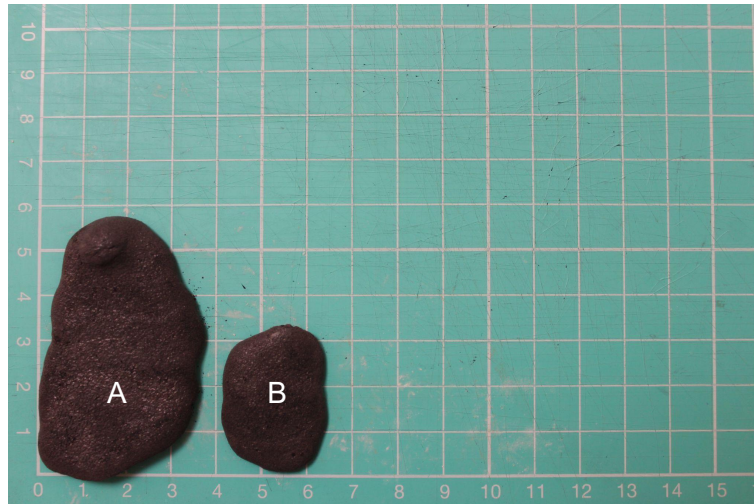


Figura 76 - Filamento Teste de extrusão com carvão de granulometria < 1 mm

No 23º teste conseguiu-se a extrusão do material, mas percebe-se que os filamentos têm excesso de água, é possível ver uma ligeira redução do excesso de água do A para o B, mas nenhum deles apresenta consistência ou aspeto de um filamento impresso. Contudo é possível ver, nitidamente, o pigmento preto que o carvão oferece à argamassa.

No 23º teste, teste de extrusão com carvão de granulometria <1 mm, houve sobra de material e foi possível realizar também um teste de amostra do material.

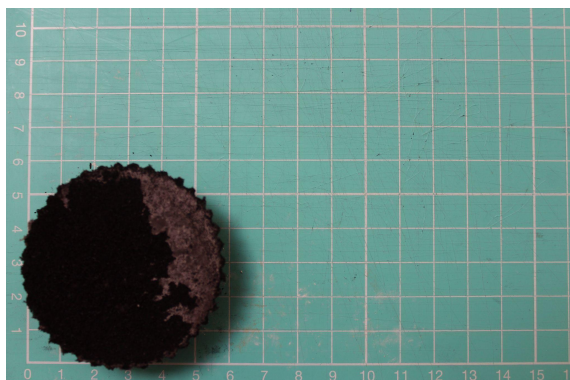


Figura 77 - Teste de amostra com carvão de granulometria < 1 mm – parte de cima

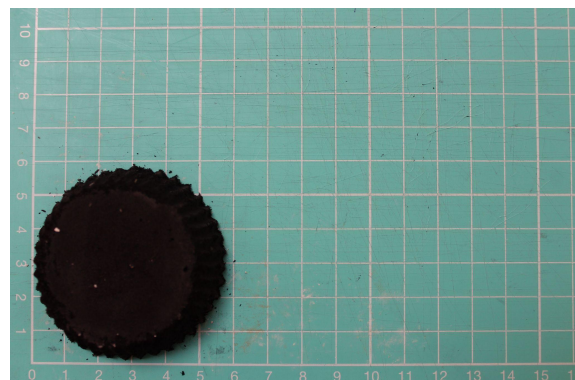


Figura 78 - Teste de amostra com carvão de granulometria < 1 mm – parte de baixo

Apesar da facilidade na identificação da pigmentação preta do carvão na argamassa seca, com os resultados obtidos na extrusão deste material este teve que ser posto de parte.

III. Caso de Estudo

Avaliação e conclusão

Nesta fase de testes foi possível testar diferentes variações da argamassa. Alterações de percentagem de quantidade dos materiais, diferentes granulometrias dos materiais e diferentes resíduos de construção.

Os testes que tiveram melhores resultados foram o 11º, 13º, 14º, 15º e 17º pois foram os testes que tiveram desempenho superior na extrusão de um filamento uniforme e consistente. Com estes testes foi possível perceber qual o rácio, granulometria e material com comportamento mais adequado na simulação de extrusão. O rácio de material que melhor funcionou anda, em média, à volta dos 45% de RCD e 55% de cimento. Quanto à granulometria, a que melhor comportamento mostrou, a nível de textura, foi entre os 3-4 mm, mas a nível de pigmento percebeu-se que funciona melhor uma granulometria mais baixa, inferior a 1 mm. Relativamente aos materiais, no que toca a trabalhabilidade e extrusão, os que obtiveram resultados superiores foi o vidro e o tijolo, sendo que o tijolo permitiu a extrusão com mais variações de percentagens de material e diferentes granulometrias.

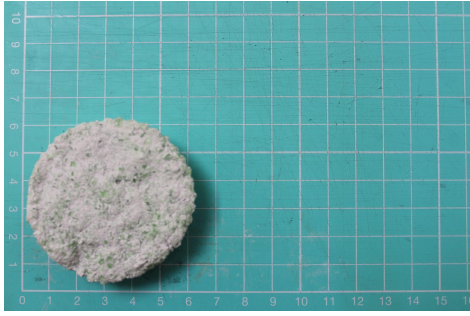


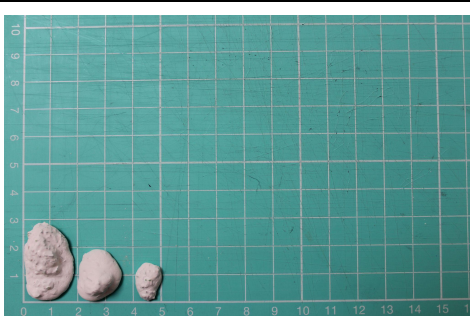
Com estes testes foram excluídos materiais como: aglomerado de pneu, cortiça e plástico; cortiça; poliestireno expandido e carvão, pois apesar de no final terem algum valor estético, pela cor característica que deixam na argamassa, são matérias-primas complicadas de trabalhar, por serem demasiado leves e de difícil aglomeração com o cimento.

Assim o foco mantém-se principalmente no vidro e no tijolo. Sendo que foi possível verificar que estes 2 materiais têm mais valor estético quando trabalhados em pó (granulometria inferior a 1 mm) ou com mais percentagem de cimento.






Uma vez que o objetivo é criar uma argamassa usando o máximo de desperdícios de construção, nos próximos testes irão ser usadas apenas duas granulometrias, <1 mm e 3-4 mm, e tentar-se-á usar a menor percentagem de cimento possível com uma redução gradual da mesma.

III. Caso de Estudo

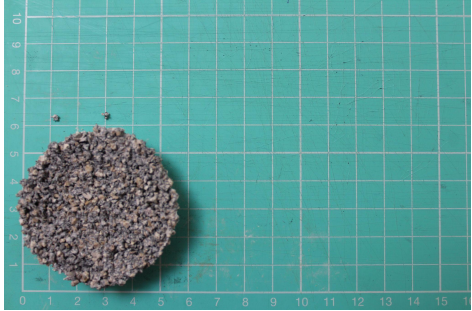
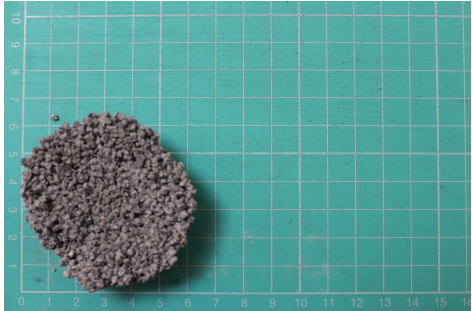


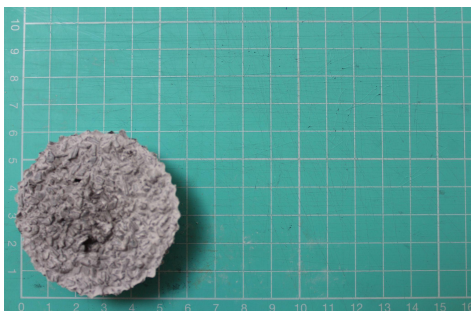
Tabela 6 - Resultados Testes Fase 3

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
8	Vidro Verde	<3 mm	
10	Vidro Verde	<1 mm	
11	Vidro Verde	3-4 mm	
12	Vidro Verde	<4 mm	

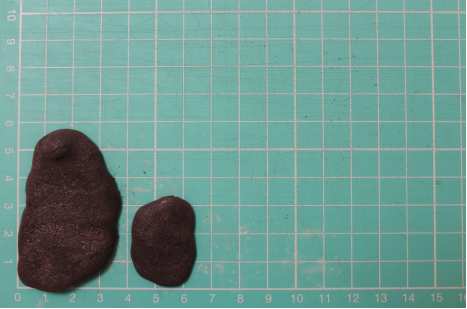
III. Caso de Estudio

13	Vidro Verde	3-4 mm	
14	Vidro Verde	2-3 mm	
15	Tijolo	<1 mm	
16	Tijolo	3-4 mm	
17	Tijolo	3-4 mm	

III. Caso de Estudo

18	Aglomerado de pneu, plástico e cortiça	<4 mm	
19	Cortiça Negra	3-4 mm	
20	Cortiça Negra	<1 mm	
21	Poliestireno expandido	<4 mm	
22	Carvão	3-4 mm	

III. Caso de Estudo

23	Carvão	<1 mm	
----	--------	-------	--

III. Caso de Estudo

4.4. Fase 4: Teste da extrusão das argamassas desenvolvidas com redução de cimento

Com base nas conclusões dos testes anteriores com diferentes resíduos de construção, decidiu-se dar continuidade apenas aos testes com vidro e tijolo. Na fase 3 foi possível verificar que estes dois RCD são mais fáceis de trabalhar, que os restantes, e há mais oportunidade para redução da percentagem de cimento na argamassa final.

Objetivos

Nos ensaios que se seguem foi testada a *extrudability* do material, reduzindo gradualmente a percentagem de cimento na argamassa, de teste para teste. Este ensaio pretende assegurar a deposição em filamentos contínuos e estáveis, da argamassa, através de um bocal.

O objetivo foi reduzir ao máximo o cimento e perceber quais as vantagens e desvantagens na argamassa extrudida.

Teste de *extrudability* é a capacidade que a argamassa tem de ser pressionada para fora do bocal de forma contínua. A característica que mais influencia a *extrudability* de um material é a fluidez do mesmo, o que significa que quanto mais fluido for o material melhor a sua capacidade de ser extrudido. Já a fluidez do material é influenciada pela mistura dos seus componentes, as suas propriedades e proporções. (Malaeb et al., 2019) Assim a principal meta a alcançar com estes testes é a consistência certa da mistura para que possa ser mais tarde impressa em 3D. Nesta fase dedicar-se-á também atenção ao rácio entre RCD e cimento e à paleta cromática que os materiais têm para oferecer.

Metodologia

Foram realizados 4 tipos de amostras, 2 com tijolo e 2 com vidro. Em todas as amostras o cimento foi sendo retirado gradualmente de 33% a 5% da mistura. O tijolo e vidro foram utilizados em pó e em areia, com granulometria inferior a 4 mm, como se pode ver nas figuras 79 e 80. O processo de tratamento dos materiais foi igual ao de todos ou outros testes.

III. Caso de Estudo



Figura 79 - Tijolo granulometria <1 mm



Figura 80 - Tijolo granulometria 3-4 mm

Testes com Tijolo em Pó

Os primeiros testes foram realizados com tijolo em pó, granulometria inferior a 1 mm.

Tabela 7 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com tijolo em pó

Teste com Tijolo em Pó			
1.	2.	3.	4.
	SE 1. RESULTAR	SE 2. RESULTAR	SE 3. RESULTAR
Percentagem de Material: 67% - cimento 33% - tijolo	Percentagem de Material: 15% - cimento 85% - tijolo	Percentagem de Material: 10% - cimento 90% - tijolo	Percentagem de Material: 5% - cimento 95% - tijolo

1. 24º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 30g tijolo
- 15g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

III. Caso de Estudo



Figura 81 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 67% de tijolo de granulometria < 1 mm

O 24º teste foi semelhante ao 15º teste em termos de percentagem de RCD e cimento. Decidiu-se testar novamente esse rácio por ter sido o teste com pó de tijolo que obteve melhores resultados anteriormente. Nota-se no filamento A alguma dificuldade no início da simulação da impressão e no fim do filamento C alguma falta de água que demonstra o fim da *open window* da mistura. Ainda assim, é possível ver que a extrusão do material correu de forma esperada que os filamentos mostram boa consistência e uma cor alaranjada proveniente do tijolo.

2. 25º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 34g tijolo
- 6g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água



Figura 82 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 85% de tijolo de granulometria < 1 mm

No 25º teste já foi feita uma redução da percentagem de RCD e cimento face ao teste anterior. Contrariamente ao esperado, no primeiro filamento (A) nota-se alguma falta de água, na amostra B existe boa consistência e uniformidade ao longo da mesma e em C observa-se algum excesso de água. Contudo a extrusão foi possível e a cor alaranjada nos filamentos foi intensificada pela presença de mais pó de tijolo na mistura.

III. Caso de Estudo

3. 26º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 37g tijolo
- 4g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 16ml água

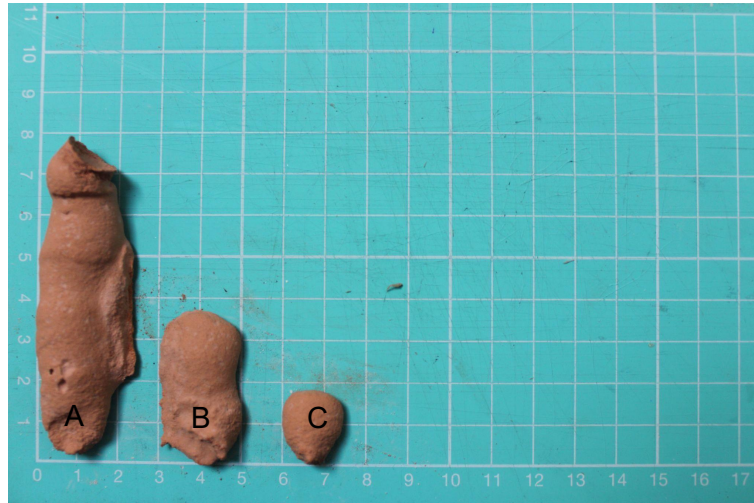


Figura 83 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 90% de tijolo de granulometria < 1 mm

No 26º teste houve mais uma redução gradual da percentagem de cimento. Vê-se que o tempo ótimo de impressão acontece entre as amostras A e B, no filamento A existe um ligeiro excesso de água, mas ainda assim a extrusão apresenta boa viscosidade de material. O filamento B ainda mostra boa consistência mas no seu final, bem como na amostra C, pode-se ver o fim da *open window*. É possível, mais uma vez, ver o aumento da intensidade da cor laranja face ao teste anterior.

4. 27º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 38g tijolo
- 2g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 18ml água



Figura 84 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 95% de tijolo de granulometria < 1 mm

III. Caso de Estudo

Depois de mais uma redução da percentagem de cimento presente na argamassa, no 27º teste é possível ver a extrusão de um filamento mais longo que os anteriores com boa consistência e uniforme ao longo de todo ele. Mais uma vez a cor laranja do tijolo foi intensificada.

Com estes 4 testes foi possível retirar a conclusão que facilmente se identifica o acentuar da cor de tijolo no filamento à medida que se reduz a percentagem de cimento na argamassa. Apesar da quantidade de água também ter aumentado, face à quantidade de cimento, a argamassa manteve a consistência, sendo de fácil extrusão.

Com estas conclusões e com o sucesso do filamento do 27º teste, percebeu-se que o tijolo aguenta bastante bem a extrusão por si só, pelo que se decidiu realizar um teste com 100% de tijolo na argamassa, sem qualquer ligante.

28º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 40g tijolo
- 20ml água

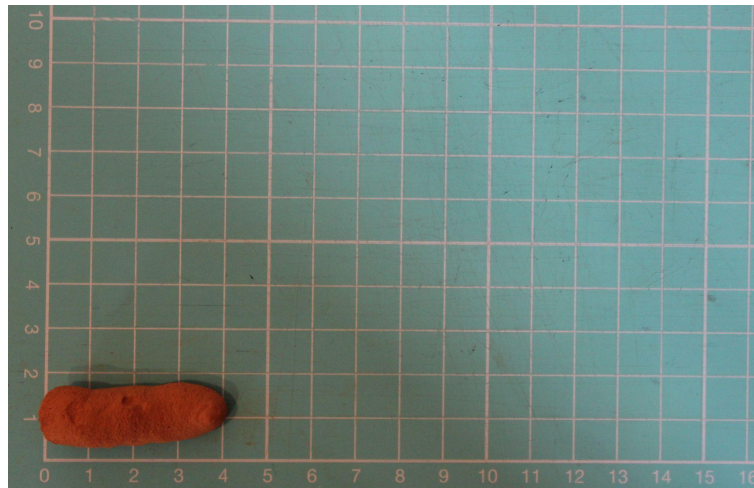


Figura 85 - Filamento Teste de extrudability com 100% de tijolo de granulometria < 1 mm

A extrusão deste material apesar de ter sido possível, notou-se que foi mais difícil que a extrusão dos testes anteriores, contudo no final mostrou-se ser exequível a extrusão de um pequeno filamento com 100% de pó de tijolo misturado com água.

III. Caso de Estudo

Testes com Tijolo Granulometria 4 mm

De seguida decidiu-se realizar exatamente os mesmos 4 ensaios anteriores, mas em vez de se utilizar pó de tijolo (material com granulometria inferior a 1 mm) decidiu-se utilizar tijolo com granulometria entre 3-4 mm.

Teste com Tijolo Granulometria 3-4mm			
1.	2.	3.	4.
	SE 1. RESULTAR	SE 2. RESULTAR	SE 3. RESULTAR
Percentagem de Material: 33% - cimento 67% - tijolo	Percentagem de Material: 15% - cimento 85% - tijolo	Percentagem de Material: 10% - cimento 90% - tijolo	Percentagem de Material: 5% - cimento 95% - tijolo

1. 29º TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <4 mm

Componentes:

- 20g tijolo
- 10g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 10ml água



Figura 86 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento, 67% de tijolo de granulometria 3-4 mm

O 29º teste foi semelhante ao 16º em termos de percentagem de RCD e cimento. Decidiu-se testar novamente esse rácio pois achou-se que depois de todo o conhecimento obtido seria possível obter melhores resultados que os anteriores. Neste teste nota-se que nenhuma amostra tem aparência de filamento impresso e que há uma notável perda de água de A para C. As amostras revelam alguma cor de tijolo, mas principalmente textura através dos grãos. Apesar do teste não ter corrido como esperado decidiu-se tentar na mesma reduzir a percentagem de cimento presente na mistura.

III. Caso de Estudo

2. 30° TESTE - Extrusão com tijolo, granulometria <4 mm

Componentes:

- 23g tijolo
- 4g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 8ml água

O 30° teste, teste de *extrudability* com redução de cimento com 85% de tijolo de granulometria 3-4 mm, falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

Com o tijolo de granulometria 3-4 mm já só foi possível realizar 2 testes. Considerando a redução da percentagem de componentes para 85% tijolo e 15% cimento, já não houve extrusão de material. A principal desvantagem deste resultado foi a perda de material, pois se fosse possível usar todo o desperdício de tijolo com granulometria inferior a 4 mm o aproveitamento seria muito maior. De seguida realizaram-se os mesmos 2 pares de testes, mas desta vez com o vidro como material principal. Começou-se por utilizar vidro em pó com granulometria inferior a 1 mm.

Testes com Vidro em Pó

Os primeiros testes foram realizados com vidro em pó, granulometria inferior a 1 mm.

Tabela 8 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com vidro em pó

Teste com Vidro em Pó			
1.	2.	3.	4.
	SE 1. RESULTAR	SE 2. RESULTAR	SE 3. RESULTAR
Percentagem de Material: 33% - cimento 67% - vidro	Percentagem de Material: 15% - cimento 85% - vidro	Percentagem de Material: 10% - cimento 90% - vidro	Percentagem de Material: 5% - cimento 95% - vidro

III. Caso de Estudo

1. 31º TESTE - Extrusão com vidro âmbar, granulometria <1 mm

Componentes:

- 30g vidro âmbar
- 15g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

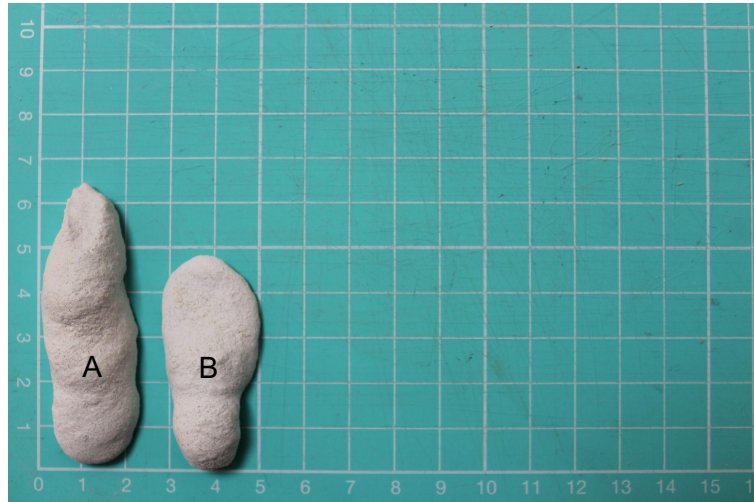


Figura 87 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 67% vidro de granulometria < 1 mm

O 31º teste foi semelhante ao 10º teste em termos de percentagem de RCD e cimento. Decidiu-se testar novamente esse rácio por ter sido um dos testes com pó de vidro que obteve melhores resultados. Nota-se no filamento A boa consistência e um aspeto uniforme. Já na amostra B existe algum excesso de água, contudo a extrusão foi possível. Infelizmente o pó de vidro não dá um forte pigmento à argamassa seca, como acontece com o tijolo.

III. Caso de Estudo

2. 32º TESTE - Extrusão com vidro âmbar, granulometria <1 mm

Componentes:

- 34g vidro âmbar
- 6g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água



Figura 88 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 85% vidro de granulometria < 1 mm

O 32º teste já foi feito uma redução da percentagem de RCD e cimento face ao teste anterior. Em ambos os filamentos, A e B, nota-se excesso de água, bem como na amostra B se nota um aglomerar de material no fim da extrusão. Já é possível ver algum brilho nos filamentos, devido à utilização do vidro, e um tom acastanhado.

III. Caso de Estudo

3. 33° TESTE - Extrusão com vidro âmbar, granulometria <1 mm

Componentes:

- 37g vidro âmbar
- 4g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 16ml água

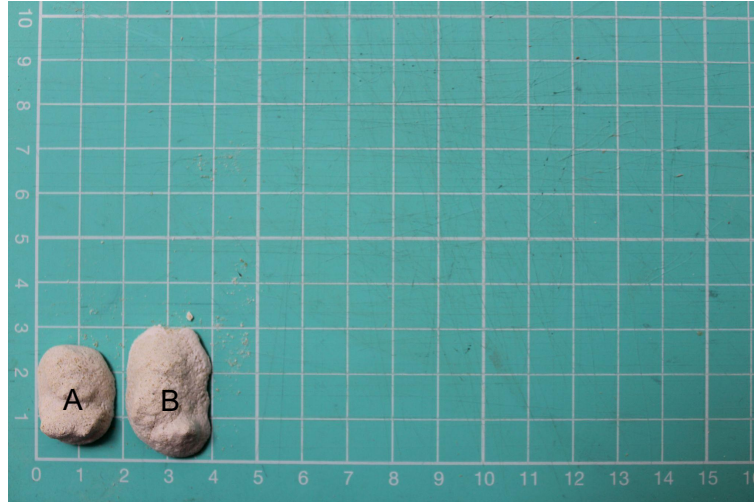


Figura 89 - Filamento Teste de extrudability com redução de cimento com 90% vidro de granulometria < 1 mm

No 33° teste houve mais uma redução gradual da percentagem de cimento. Vê-se que os filamentos têm mais consistência que nos testes anteriores, mas que o tempo ótimo de impressão foi muito curto. É possível ver alguma intensificação do tom acastanhado do vidro na argamassa.

O teste 4 com pó de vidro já não foi realizado, uma vez que no teste 3 a argamassa já mal se conseguiu extrudir. Estes 3 testes foram, contudo, suficientes para se tirar algumas conclusões. Apesar de não ser tão marcante como nos testes com pó de tijolo, é possível identificar a cor âmbar na argamassa seca e ver que se acentua mais à medida que a percentagem de cimento foi sendo reduzida na argamassa. Esta diminuição levou a que a consistência da argamassa fosse ficando mais aguada, a mistura dos componentes mais difícil de conseguir, e conseqüentemente, mais difícil a extrusão da mistura.

III. Caso de Estudo

Testes com Vidro Granulometria 4 mm

À semelhança do efetuado com o tijolo, depois dos testes com pó de vidro, foram realizados exatamente os mesmos ensaios utilizando vidro com granulometria entre 3-4 mm.

Tabela 9 - Guia de percentagem de material para testes de extrudability com vidro de granulometria 4 mm

Teste com Vidro Granulometria 3-4 mm			
1.	2.	3.	4.
	SE 1. RESULTAR	SE 2. RESULTAR	SE 3. RESULTAR
Percentagem de Material: 33% - cimento 67% - vidro	Percentagem de Material: 15% - cimento 85% - vidro	Percentagem de Material: 10% - cimento 90% - vidro	Percentagem de Material: 5% - cimento 95% - vidro

1. 34° TESTE - Extrusão com vidro âmbar, granulometria <4 mm

Componentes:

- 20g vidro âmbar
- 10g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 10ml água

O 34° teste, teste de *extrudability* com redução de cimento com 67% de vidro de granulometria 3-4 mm, falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

Com o vidro de granulometria 3-4 mm apenas se realizou 1 teste. Uma vez que logo no primeiro teste com 67% vidro e 33% cimento não houve extrusão de material. Mais uma vez a maior desvantagem disto é o menor aproveitamento de material.

III. Caso de Estudo

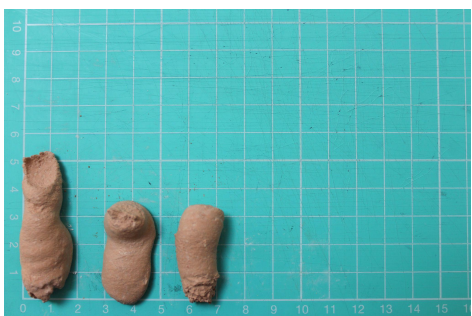

Avaliação e conclusão

Nesta fase de testes foi possível testar a redução gradual da percentagem de cimento presente nas misturas de argamassa desenvolvida. Foram testados dois RCD, tijolo e vidro, por terem sido os materiais que na fase 3 de testes, testagem de extrusão, os que obtiveram melhores resultados. Ambos foram testados em duas granulometrias diferentes, pó (grão inferior a 1 mm) e areias (grão entre 3-4 mm).



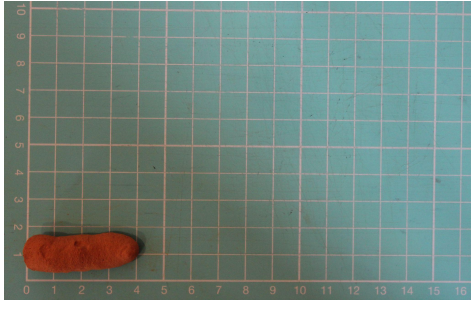


Com base nestes testes percebeu-se que o tijolo foi, dos dois RCD, o que mostrou melhores resultados na extrusão de misturas com diminuição de cimento. Usando os resíduos em pó, no caso do tijolo é possível extrudir filamentos com baixas percentagens de cimento ou até mesmo sem nenhum cimento na mistura, no caso do vidro foi possível a extrusão até um mínimo de 10% de cimento na mistura. No caso da granulometria entre 3-4 mm encontraram-se mais dificuldades, os testes feitos com esta dimensão de grão foram inferiores aos feitos com o grão inferior a 1 mm visto que a extrusão foi poucas vezes conseguida. A principal desvantagem deste resultado é a perda de material, pois caso fosse possível usar todo o desperdício de tijolo com granulometria inferior a 4 mm o aproveitamento de material seria maior. Ainda assim, voltar-se-á a testar a areia de RCD pois ficou a dúvida se o problema foi da areia ou da redução abrupta de cimento.

De todo o modo, com os resultados obtidos nesta fase 4 o melhor caminho a seguir, é a utilização do tijolo em pó, pois para além de ter sido o RCD com melhores desfechos na testagem, é também o RCD que mais benefícios visuais traz à argamassa final. Assim, para os testes que se seguem de *buildability* apenas se usará tijolo em pó.



Tabela 10 - Resultados Testes Fase 4

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
24	Tijolo	<1 mm	
25	Tijolo	<1 mm	

III. Caso de Estudo

26	Tijolo	<1 mm	
27	Tijolo	<1 mm	
28	Tijolo	<1 mm	
29	Tijolo	3-4 mm	
31	Vidro Âmbar	<1 mm	

III. Caso de Estudo

32	Vidro Âmbar	<1 mm	
33	Vidro Âmbar	<1 mm	

III. Caso de Estudo

4.5. Fase 5: Teste de *buildability* das argamassas desenvolvidas com redução de cimento

Depois de testada a *extrudability* das argamassas foi necessário testar a *buildability* das mesmas. *Buildability* é a capacidade que a argamassa tem de suportar a deposição de material, camada por camada, conservando as suas dimensões sob carga crescente. (Nerella et al., 2020).

Objetivos

Estes ensaios foram realizados com uma redução gradual da percentagem de cimento na argamassa igual à dos testes anteriores. O objetivo foi novamente reduzir ao máximo o cimento e perceber quais as vantagens e desvantagens na argamassa extrudada. Estes testes pretendem assegurar o empilhamento sucessivo de camadas sem deformação excessiva da argamassa.

Mais uma vez, nestes ensaios a característica que mais influencia a *buldability* de um material é a fluidez do mesmo. Uma vez que a fluidez foi testada nos testes de *extrudability*, apenas seguiram para este teste os materiais que cumpriam esse requisito. Assim, a principal meta a alcançar com este teste é o filamento suportar a sobreposição de camadas sobre ele.

Metodologia

Pegando em todos os materiais que passaram no teste de *extrudability*, repetiu-se a mesma sequência de ensaios, sendo que nestes ensaios sobrepôs-se 3 camadas de cada material.

Os testes foram todos realizados com tijolo em pó, granulometria inferior a 1mm.

Tabela 11 - Guia de percentagem de material para testes de *buildability* com tijolo em pó

Teste com Tijolo em Pó			
1.	2.	3.	4.
	SE 1. RESULTAR	SE 2. RESULTAR	SE 3. RESULTAR
Percentagem de Material: 25% - cimento 75% - tijolo	Percentagem de Material: 15% - cimento 85% - tijolo	Percentagem de Material: 10% - cimento 90% - tijolo	Percentagem de Material: 5% - cimento 95% - tijolo

III. Caso de Estudo

1. 35° TESTE - Sobreposição de camadas com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 75g tijolo
- 25g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 40ml água



Figura 90 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 75% de tijolo de granulometria < 1 mm

No 35° foi usado um rácio diferente 75% de tijolo e 25% de cimento, optou-se por estes valores pois o rácio 67%-33% já tinha sido previamente testado e porque o objetivo desta fase, para além de testes de *buildability*, continua a ser redução gradual do cimento na argamassa. Na figura 90 consegue-se ver que a sobreposição de camadas foi conseguida e é possível distinguir facilmente 3 camadas. Nota-se que o filamento da última camada já não tem a mesma uniformidade que nas primeiras duas camadas, mas ainda assim foi possível simular a extrusão de construção de 3 camadas com quase 3 cm de altura.

III. Caso de Estudo

2. 36° TESTE - Sobreposição de camadas com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 85g tijolo
- 15g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 45ml água



Figura 91 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 85% de tijolo de granulometria < 1 mm

O 36° teste foi feita uma redução da percentagem de cimento face ao teste anterior. Consegue-se ver que neste teste a uniformidade dos filamentos foi mantida ao longo das 3 camadas, o que é uma melhoria face ao teste anterior. Nota-se um achatamento do primeiro e segundo filamento devido ao peso das camadas sobrepostas, mas ainda assim foi possível aumentar ligeiramente a construção das 3 camadas em relação ao 36° teste. Além disso é possível ver uma intensificação do pigmento de tijolo na argamassa.

III. Caso de Estudo

3. 37º TESTE - Sobreposição de camadas com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 90g tijolo
- 10g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 45ml água

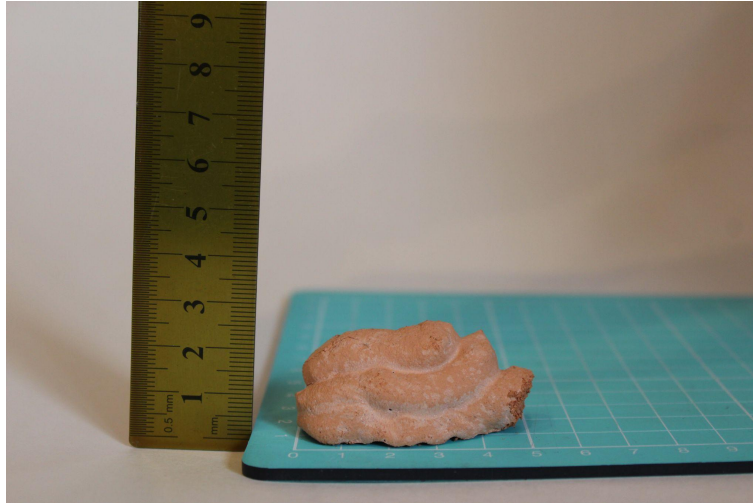


Figura 92 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 90% de tijolo de granulometria < 1 mm

No 36º teste, mais uma vez, existiu uma redução da percentagem de cimento, em relação ao teste anterior. Pela figura 92 é possível ver-se que este ensaio não obteve resultados tão positivos como os dois testes anteriores, apesar de ser possível a distinção de 3 camadas, os filamentos não são uniformes e mostram falta de consistência. É novamente notável um aumento da tonalidade alaranjada na argamassa.

III. Caso de Estudo

4. 38º TESTE - Sobreposição de camadas com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 95g tijolo
- 5g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 45ml água



Figura 93 - Filamento Teste de buildability com redução de cimento, 95% de tijolo de granulometria < 1 mm

Reduziu-se mais uma vez a percentagem de cimento, no 38º teste, em relação ao anterior. Neste teste pode-se afirmar que não houve sobreposição de camadas, não é sequer possível distinguir quantos filamentos foram extrudidos e sobrepostos. O material mostrou pouca resistência na sua composição, fazendo com que a camada inferior se unisse com a superior em vez de a suportar.

III. Caso de Estudo

39º TESTE - Sobreposição de camadas com tijolo, granulometria <1 mm

Componentes:

- 100g tijolo
- 50ml água



Figura 94 - Filamento Teste de buildability com 100% de tijolo de granulometria < 1 mm

Apesar de o 38º teste ter falhado, por não ter sido possível sobrepor camadas do material desenvolvido decidiu-se ainda fazer um teste sem a utilização de cimento. Bem como no teste anterior não houve sobreposição de camadas e os filamentos agregaram-se uns aos outros.



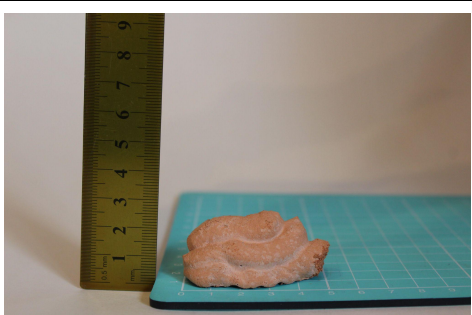
III. Caso de Estudo

Avaliação e conclusão

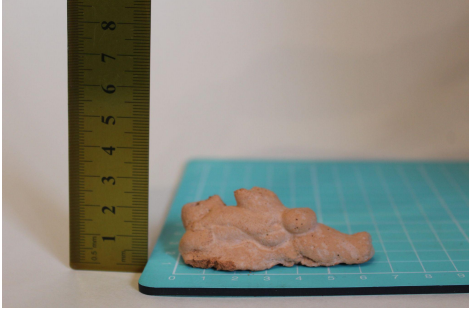
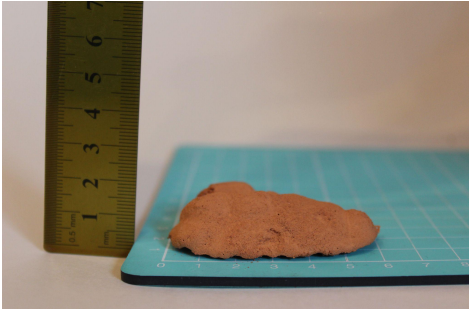
Nesta fase de testes foi possível testar a *buildability* de alguns materiais desenvolvidos até então e continuar a redução gradual da percentagem de cimento presente nas misturas. Apenas foi testado um RCD, tijolo, numa granulometria inferior a 1 mm.

Com estes 5 testes conseguimos concluir que os primeiros 3 testes funcionaram, sendo possível distinguir perfeitamente as 3 camadas de material e verificar que pouco achataram com a sobreposição de camadas. Já os 2 últimos testes não correram tão bem. No caso do ensaio com 95% tijolo e 5% cimento é difícil identificar as diferentes camadas, e no teste com 100% de tijolo, é completamente impossível. Apesar de haver 3 testes que passaram no teste de *buildability*, podemos afirmar que o 36º teste foi claramente o que funcionou melhor e que tem o rácio de material mais adequado, tendo em conta todos os testes feitos até ao momento.

Tabela 12 - Resultados Testes Fase 5

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
35	Tijolo	< 1mm	
36	Tijolo	< 1mm	
37	Tijolo	< 1mm	

III. Caso de Estudio

38	Tijolo	< 1mm	
39	Tijolo	< 1mm	

III. Caso de Estudo

4.6. Fase 6: Teste de argamassas desenvolvidas com areia reciclada

Com todos os testes necessários para perceber quais as características ideais da argamassa, para que esta seja impressa em 3D, decidiu-se fazer um último teste com base em toda a aprendizagem dos anteriores. Para além de se ir usar um material nunca antes utilizado, neste projeto, o betão, apenas se iria usar o desperdício em forma de areia, isto é, com granulometria igual ou inferior a 4 mm.

Objetivos

Estes testes têm como principal objetivo reaproveitar o máximo de material possível. Não só reaproveitando a própria argamassa seca, betão, como reaproveitando o máximo do desperdício usando uma granulometria o maior possível.

Metas a alcançar

O objetivo deste teste, como nos de *extrudability*, é conseguir um filamento consistente com o máximo de desperdício e o mínimo de cimento na sua mistura.

Metodologia

Este ensaio teve uma metodologia diferente para cada material.

Areia de Betão

Para esta fase de testes recorreu-se ao LEMC - Laboratório de Ensaios Materiais / LMC - Laboratório de Materiais de Construção no DEC, Departamento de Engenharia Civil.

No laboratório foi realizado o seguinte processo de tratamento do betão:

- Utilização de uma prensa hidráulica para quebrar os blocos de betão;
- Partiram-se os pedaços resultantes com um martelo, de forma a garantir que nenhum deles causava o entupimento do britador;
- Britou-se o betão com uma granulometria de 10 mm;
- Com todo o material britado, este foi peneirado num peneiro com abertura de 4,75 mm;
- Britou-se novamente o material com as maxilas da máquina encostadas, a uma granulometria de 0 mm;
- Após se ter britado o material na sua totalidade, este passou num peneiro com abertura de 4 mm.

III. Caso de Estudo



Figura 95 - Cacos de betão, quebrados com um martelo



Figura 96 - Britador

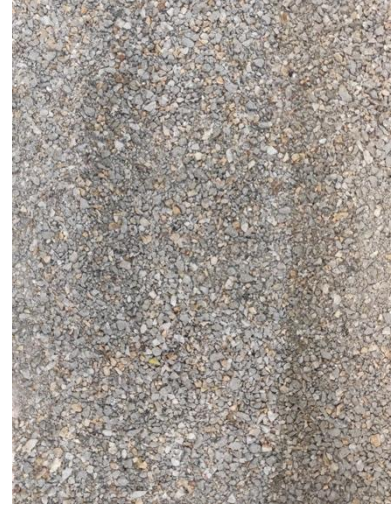


Figura 97 - Areia de betão, 4 mm

Com este tratamento conseguiu-se areia de betão. Uma parte do material seguiu para testes granulométrico, apresentados mais à frente, e outra foi usada para testes de *extrudability*.

Seguem os valores referentes aos diferentes testes.

40º TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 50g areia de betão
- 17g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio:

- 75% areia de betão
- 25% de cimento

O 40º teste, teste de *extrudability* com 75% de areia de betão falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

41º TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 44g areia de betão
- 23g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio:

- 65% areia de betão
- 35% de cimento

III. Caso de Estudo

O 41º teste, teste de *extrudability* com 65% de areia de betão falhou, pois não se conseguiu extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

42º TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 34g areia de betão
- 34g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio:

- 50% areia de betão
- 50% de cimento

O 42º teste, teste de *extrudability* com 50% de areia de betão falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

43º TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 27g areia de betão
- 40g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 18ml água

Rácio:

- 40% areia de betão
- 60% de cimento



Figura 98 - Filamento Teste de *extrudability* com 40% areia de betão

No 43º teste conseguiu-se extrudir, pela primeira vez, uma argamassa com a utilização de betão em substituição da areia. Um filamento mais longo que o habitual, uniforme e que mostra o fim da “open window” pela falta de água que se pode verificar que existe no final

III. Caso de Estudo

da extrusão. O betão não atribui cor à argamassa seca mas é possível ver alguma textura na figura 98.

44º TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 23g areia de betão
- 44g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 18ml água

Rácio:

- 35% areia de betão
- 65% de cimento



Figura 99 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de betão

O 44º teste teve uma percentagem ligeiramente maior de cimento que o anterior, de 65%. Esse aumento foi feito, tendo em conta que o filamento conseguido no 43º teste não mostrou consistência suficiente para impressão. Na figura 99 consegue-se ver um filamento longo e uniforme, talvez umas das extrusões que obteve melhores resultados a nível de consistência. Na argamassa seca infelizmente o único valor visual que este RCD tem é a textura que deixa no filamento.

III. Caso de Estudo

45° TESTE - Extrusão com areia de betão

Componentes:

- 17g areia de betão
- 50g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 20ml água

Rácio:

- 25% areia de betão
- 75% de cimento



Figura 100 - Filamento Teste de extrudability com 25% areia de betão

No 45° teste voltou a haver um aumento da percentagem de cimento, de 65% para 75%. Apesar de o filamento ter sido mais extenso neste teste que nos dois anteriores, denota algum excesso de água no início da extrusão e alguma falta da mesma no final. Para além disso, como vemos na figura 100 o filamento quebrou depois de seco.

Conclusões

A extrudabilidade do material foi testada com um aumento gradual da percentagem de cimento no 3DCP. O objetivo era compreender de que forma o cimento influencia o filamento e perceber as vantagens e desvantagens no material.

Com estes testes conseguiu-se perceber que o betão é um material com muito valor a nível de economia circular, uma vez que utilizamos a argamassa antiga para produzir argamassa nova.

No caso do betão o melhor rácio cimento-RCD é de 65% de cimento com 35% de areia, uma vez que no 43° teste o filamento conseguido foi pouco extenso e no 45° teste o filamento quebrou.

III. Caso de Estudo

Areia de Tijolo

Tal como nos testes com areia de betão, nesta fase de testes recorreu-se ao LEMC - Laboratório de Ensaios Materiais / LMC - Laboratório de Materiais de Construção no DEC, Departamento de Engenharia Civil.

O tratamento do tijolo no laboratório foi bastante semelhante ao do betão:

- Quebrar os blocos de tijolo com um martelo, de forma a garantir que nenhum deles causava o entupimento do britador (fig.101);
- Britou-se o tijolo com uma granulometria de 2,5 mm (fig.102);
- Com todo o material britado, este foi peneirado num peneiro com abertura de 4,75 mm;
- Britou-se novamente o material com as maxilas da máquina encostadas, a uma granulometria de 0 mm;
- Após se ter britado o material na sua totalidade, este passou num peneiro com abertura de 4 mm (fig.103).



Figura 101 - Cacos de tijolo, quebrados com um martelo



Figura 102 - Britador

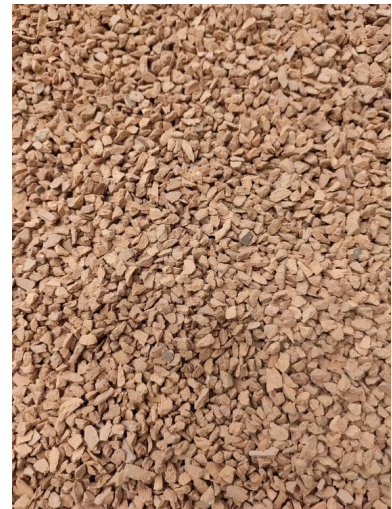


Figura 103 - Areia de tijolo, 4 mm

Com este tratamento conseguiu-se areia de tijolo. Uma parte do material seguiu para testes granulométrico, apresentados mais à frente, e outra foi usada para testes de *extrudability*.

Seguem os valores referentes aos diferentes testes.

III. Caso de Estudo

46° TESTE - Extrusão com areia de tijolo

Componentes:

- 50g areia de tijolo
- 17g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 20ml água

Rácio:

- 75% areia de tijolo
- 25% de cimento

O 46° teste, teste de *extrudability* com 75% de areia de tijolo falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

47° TESTE - Extrusão com areia de tijolo

Componentes:

- 44g areia de tijolo
- 23g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 20ml água

Rácio:

- 65% areia de tijolo
- 35% de cimento

O 47° teste, teste de *extrudability* com 65% de areia de tijolo falhou, pois não se conseguiu extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

III. Caso de Estudo

48° TESTE - Extrusão com areia de tijolo

Componentes:

- 34g areia de tijolo
- 34g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 22ml água

Rácio:

- 50% areia de tijolo
- 50% de cimento



Figura 104 - Filamento Teste de extrudability com 50% areia de tijolo

No 48° teste, ao contrário do 42° teste com areia de betão, foi possível extrudir a mistura desenvolvida com a mesma quantidade de areia de tijolo e cimento. O filamento é uniforme, contudo nota-se alguma falta de água na mistura. Nesta extrusão é possível ver o pigmento alaranjado que o tijolo dá à argamassa seca, bem como a textura da areia.

III. Caso de Estudo

49º TESTE - Extrusão com areia de tijolo

Componentes:

- 27g areia de tijolo
- 40g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 22ml água

Rácio:

- 40% areia de tijolo
- 60% de cimento



Figura 105 - Filamento Teste de extrudability com 40% areia de tijolo

O 49º teste teve uma percentagem ligeiramente maior de cimento, em relação ao teste anterior, passando de 50% para 60%.

Na figura 105 consegue-se ver um aumento de 3 cm no filamento face ao 48º teste. Esta extrusão foi longa e para além disso mostrou uniformidade, infelizmente o tom alaranjado do tijolo perdeu-se ligeiramente com o aumento da percentagem de cimento. A textura do RCD continua a ter uma forte presença na argamassa.

III. Caso de Estudo

50° TESTE - Extrusão com areia de tijolo

Componentes:

- 23g areia de tijolo
- 44g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 25ml água

Rácio:

- 35% areia de tijolo
- 65% de cimento



Figura 106 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de tijolo

Depois do teste anterior voltou a aumentar-se ligeiramente a quantidade de cimento na argamassa, ficando assim com 65%. Na figura 106 podemos ver o maior filamento que se conseguiu extrudir até agora com o tubo de pasteleiro (16 cm). Nota-se excesso de água, em alguns pontos ao longo do filamento, mas ainda assim a extrusão foi possível e com boa consistência do material. A cor do tijolo perdeu novamente a intensidade devido à diminuição do tijolo presente na mistura.

Conclusões

A extrudabilidade do material foi testada com um aumento gradual da percentagem de cimento no 3DPM, variando entre os 25% e 65%. O objetivo era utilizar a menor quantidade de cimento possível, mas também perceber as vantagens e desvantagens do mesmo na extrudabilidade da mistura. Com estes testes conseguiu-se perceber que o tijolo é um material com muito valor estético uma vez que dá à argamassa um tom alaranjado. No caso do tijolo o melhor rácio cimento-RCD é de 60% de cimento com 40% de areia. Apesar de os outros testes, a partir de 50% de RCD e 50% de cimento, terem funcionado bem o 49° teste foi o que mostrou melhor consistência na argamassa, extrusão e filamento, mantendo a tonalidade alaranjada atribuída pelo tijolo.

III. Caso de Estudo

Areia de Vidro

Para esta fase de testes recorreu-se ao Laboratório de Processamento de Minérios no DEMM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais.

O tratamento do vidro no laboratório foi mais simples que o betão e tijolo:

- Quebrar as garrafas de vidro com um martelo, de forma a garantir que os cacos não causavam o entupimento do britador (fig. 107);
- Britou-se o vidro com uma granulometria de 4 mm (fig. 108).



Figura 107 - Cacos de vidro, quebrados com um martelo



Figura 108 - Areia de vidro, 4 mm

Com este tratamento conseguiu-se areia de vidro. Este material seguiu foi usado para testes de *extrudability*.

Seguem os valores referentes aos testes.

51º TESTE - Extrusão com areia de vidro verde

Componentes:

- 50g areia de vidro
- 17g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio:

- 75% areia de vidro
- 25% de cimento

O 51º teste, teste de *extrudability* com 75% de areia de vidro falhou, uma vez que não foi possível extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

III. Caso de Estudo

52° TESTE - Extrusão com areia de vidro verde

Componentes:

- 44g areia de vidro
- 23g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 15ml água

Rácio:

- 65% areia de vidro
- 35% de cimento

O 52° teste, teste de *extrudability* com 65% de areia de vidro falhou, pois não se conseguiu extrudir o material, pelo que não apresenta filamento e uma vez que o material ficou inutilizável também não apresenta amostra do material.

53° TESTE - Extrusão com areia de vidro verde

Componentes:

- 34g areia de vidro
- 34g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 18ml água

Rácio:

- 50% areia de vidro
- 50% de cimento



Figura 109 - Filamento Teste de extrudability com 50% areia de vidro

No 53° teste vê-se, mais uma vez, a extrusão do material com a mesma percentagem de RCD que cimento. Conseguiu-se simular a impressão de um filamento com areia de vidro, neste consegue-se ver que existe, na mistura, excesso de água o que torna o filamento pouco uniforme e mais achatado do que o que deveria. O vidro não dá cor à argamassa seca, mas faz com que esta fique texturada da areia utilizada.

III. Caso de Estudo

54° TESTE - Extrusão com areia de vidro verde

Componentes:

- 27g areia de vidro
- 40g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 18ml água

Rácio:

- 40% areia de vidro
- 60% de cimento



Figura 110 - Filamento Teste de extrudability com 40% areia de vidro

O 54° teste teve uma percentagem ligeiramente maior de cimento que o teste anterior. Na figura 110 consegue-se ver um filamento consistente e uniforme. Na argamassa seca infelizmente o único acrescento estético que este RCD tem é a textura que deixa no filamento.

III. Caso de Estudo

55° TESTE - Extrusão com areia de vidro verde

Componentes:

- 23g areia de vidro
- 44g cimento, SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R
- 20ml água

Rácio:

- 35% areia de vidro
- 65% de cimento



Figura 111 - Filamento Teste de extrudability com 35% areia de vidro

No 55° teste, apesar de estar presente na mistura mais cimento, acontece no filamento algo semelhante ao que aconteceu no 53° teste, existe excesso de água na mistura, o que faz com que o filamento fique irregular. Ainda assim a extrusão foi possível e o filamento foi longo.

Conclusões

A extrudabilidade do material foi testada com um aumento gradual da percentagem de cimento no 3DPM, tendo variado entre os 25% e 65%. O objetivo era testar o impacto do cimento na argamassa seca e compreender as vantagens e desvantagens do mesmo na extrudabilidade do material.

Com estes testes conseguiu-se perceber que o vidro não tem valor estético a nível cromático, mas torna a argamassa mais luminosa/cintilante devido aos reflexos do vidro. No caso do vidro o melhor rácio cimento-RCD é de 60% de cimento com 40% de areia, pois foi o teste que mostrou melhor consistência na argamassa, extrusão e principalmente filamento.

III. Caso de Estudo

Avaliação e conclusão

Nesta fase de testagem foi estudada a extrudabilidade das argamassas desenvolvidas com três tipos de areia reciclada (betão, tijolo e vidro), testes estes que foram realizados reduzindo gradualmente a percentagem de cimento no 3DPM. O objetivo era reduzir o máximo possível do cimento presente na argamassa final e compreender as vantagens e desvantagens na extrudabilidade desse material desenvolvido.

Com estes testes conseguiu-se perceber que o betão é também um material viável e uma excelente forma de transformar argamassas desgastadas em argamassas para impressão e que o melhor rácio cimento-areia de betão é de 65% de cimento com 35% de areia.

No caso dos testes com areia de tijolo, percebeu-se que este é um RCD com muito valor estético uma vez que dá à argamassa um pigmento natural alaranjado. Com este RCD o melhor rácio cimento-areia de tijolo passa a 60% de cimento com 40% de areia.





A areia de vidro mostrou não ter valor estético a nível cromático, tornando, contudo, a argamassa mais luminosa devido aos reflexos do vidro. Neste RCD o melhor rácio cimento-areia de vidro é, igualmente ao caso da areia de tijolo, de 60% de cimento com 40% de areia.

Os rácios com as diferentes areias foram definidos pelos testes que mostraram melhor consistência na argamassa, capacidade de extrusão e extensão do filamento. Assim, com base nesses testes, estimou-se como rácio “ideal” cimento-RCD, a ser usado em testes futuros com outros materiais, 60% de cimento com 40% de areia, pois todas as misturas foram imprimíveis com este rácio.





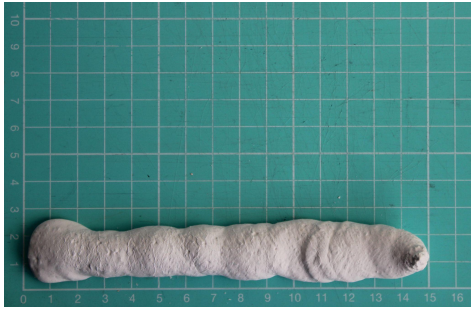
No final, concluiu-se que o tijolo é o resíduo que mais vantagens acrescenta à argamassa seca, pois foi o RCD que melhor resultados teve nos testes, *workability*, *extrudability* e *buildability*. As argamassas desenvolvidas com esse RCD foram as que mostraram melhor consistência e também as que tiveram mais valor cromático, através da pigmentação natural alaranjada que dá à argamassa seca. Assim, o passo seguinte foi testar a paleta cromática possível com o tijolo.

III. Caso de Estudo

Tabela 13 - Resultados Testes Fase 6

TESTE	RCD	GRANULOMETRIA	AMOSTRA
43	Betão	<4,75 mm	
44	Betão	<4,75 mm	
45	Betão	<4,75 mm	
48	Tijolo	<4,75 mm	

III. Caso de Estudio

49	Tijolo	<4,75 mm	
50	Tijolo	<4,75 mm	
53	Vidro Verde	<4,75 mm	
54	Vidro Verde	<4,75 mm	
55	Vidro Verde	<4,75 mm	

III. Caso de Estudo

4.7. Testes cromáticos

A *extrudability* do material foi testada com uma redução gradual da percentagem de cimento no 3DPM. O objetivo era reduzir ao máximo o cimento e compreender as vantagens e inconvenientes da *extrudability* e da cor do material. Na Tabela 13 são apresentados os materiais constituintes das composições testadas e na figura 112 a cor correspondente obtida. A extrusão do material só é possível nos testes 4, 5 e 6. Nos testes 1, 2, 3 o filamento, apesar de ter sido extrudado, era demasiado fluido, enquanto nos testes 7 a 10, houve uma clara falta de aglutinante devido ao elevado nível de segregação. Assim, pode-se concluir que a mistura deveria ter pelo menos 50% de cimento (argamassa 6) e pelo menos 30% de areia de tijolo (argamassa 4) para ser extrudida. No entanto, considerou-se que o cenário ideal para uma futura impressão seria utilizar 60% de cimento e 40% de tijolo com uma relação água/cimento (w/c) de 0,67 (argamassa 5).

Tabela 14 - Dosagem de cada amostra representada na figura 112.

TESTE	TIJOLO (TOTAL %)	TIJOLO (SÓLIDO %)	CIMENTO (TOTAL %)	CIMENTO (SÓLIDO %)	ÁGUA (TOTAL %)	ÁGUA/CIMENTO
1	0	0	71	100	29	0.70
2	7	10	60	90	33	0.89
3	13	20	50	80	37	0.75
4	20	30	47	70	33	0.71
5	27	40	40	60	33	0.67
6	36	50	36	50	28	1.00
7	40	60	27	40	33	1.25
8	44	70	19	30	37	2.00
9	45	80	11	20	44	2.50
10	43	90	6	10	41	4.00

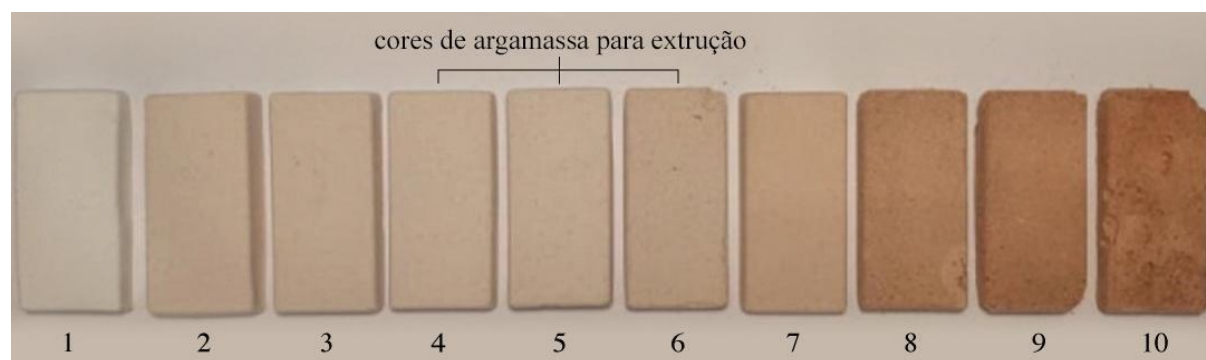


Figura 112 - Paleta cromática das composições testadas.

III. Caso de Estudo

4.8. Testes de Granulometria

Areia de Betão (anexo B)

A distribuição granulométrica da amostra da areia de betão foi determinada uma vez que a granulometria do RCD tem influência na argamassa final. Este teste controla eficazmente algumas propriedades do material, como densidade aparente, permeabilidade, etc.

O teste foi conduzido de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 933-1:2014 e consiste na divisão e separação, por meio de um conjunto de peneiros, de um material em diferentes classes de granulometria decrescente (4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,50 mm; 0,250 mm; 0,125 mm; 0,063 mm), como mostra a figura 115.

Em seguida a percentagem de material passado em cada peneiro foi calculada de acordo com a massa retida em cada peneiro e a massa inicial da amostra total, o que permitiu o desenho do gráfico apresentado abaixo (fig.113).

Representação gráfica dos resultados

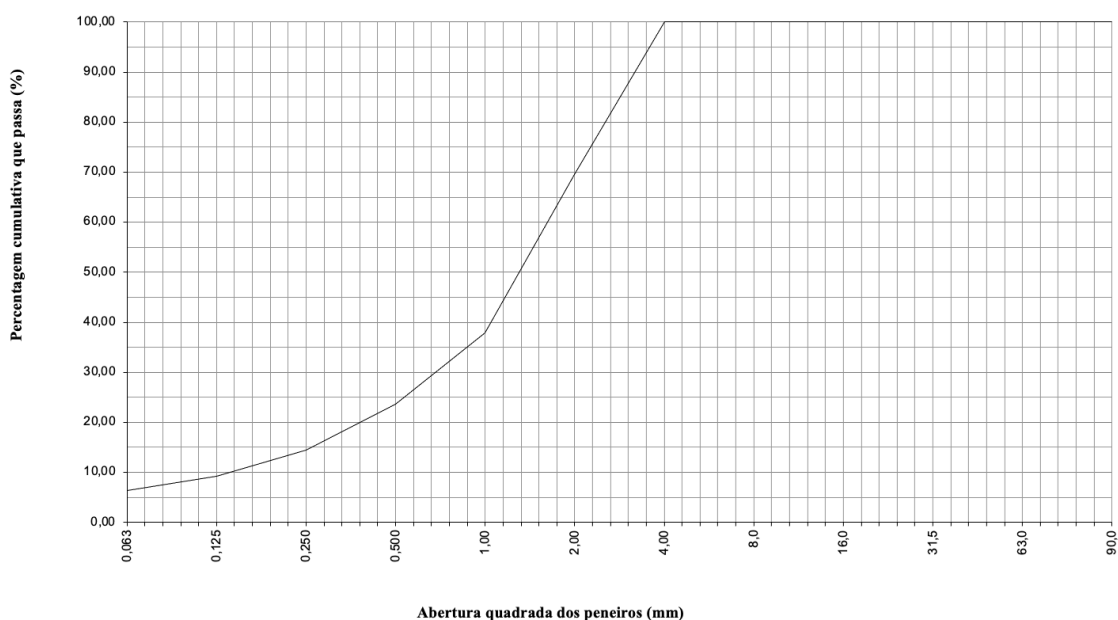


Figura 113 - Curva granulométrica da areia de betão

III. Caso de Estudo

Areia de tijolo (anexo C)

Tal como com a areia de betão, a distribuição granulométrica da areia de tijolo também foi determinada.

O teste, mais uma vez, foi conduzido de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 933-1:2014 e consiste na divisão e separação, por meio de um conjunto de peneiros (fig. 114), de um material em diferentes classes de granulometria decrescente (4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,50 mm; 0,250 mm; 0,125 mm; 0,063 mm), como mostra a figura 115.



Figura 114 - Agitador de peneiros



Figura 115 - Distribuição de granulometrias, de cima-esquerda para baixo-direita: 4 mm; 1 mm; 0,50 mm; 0,250 mm; 0,125 mm; 0,063 mm; <0,063 mm

Em seguida a percentagem de material passado em cada peneiro foi calculada de acordo com a massa retida em cada peneiro e a massa inicial da amostra total, o que permitiu o desenho do gráfico apresentado na figura 116.

III. Caso de Estudo

Representação gráfica dos resultados

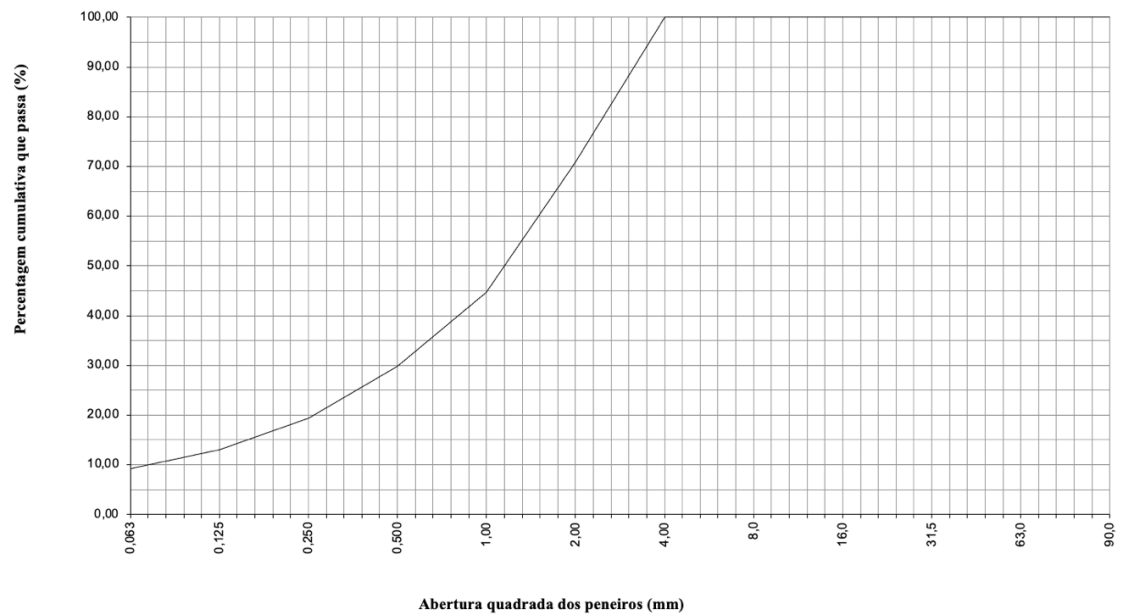


Figura 116 - Curva granulométrica da areia de tijolo.

Por fim fez-se uma comparação das curvas granulométricas entre a areia de betão e a areia de tijolo, comparando a percentagem de acumulado passado de ambas as areias (fig. 117). (anexo D)

Comparação do agregados

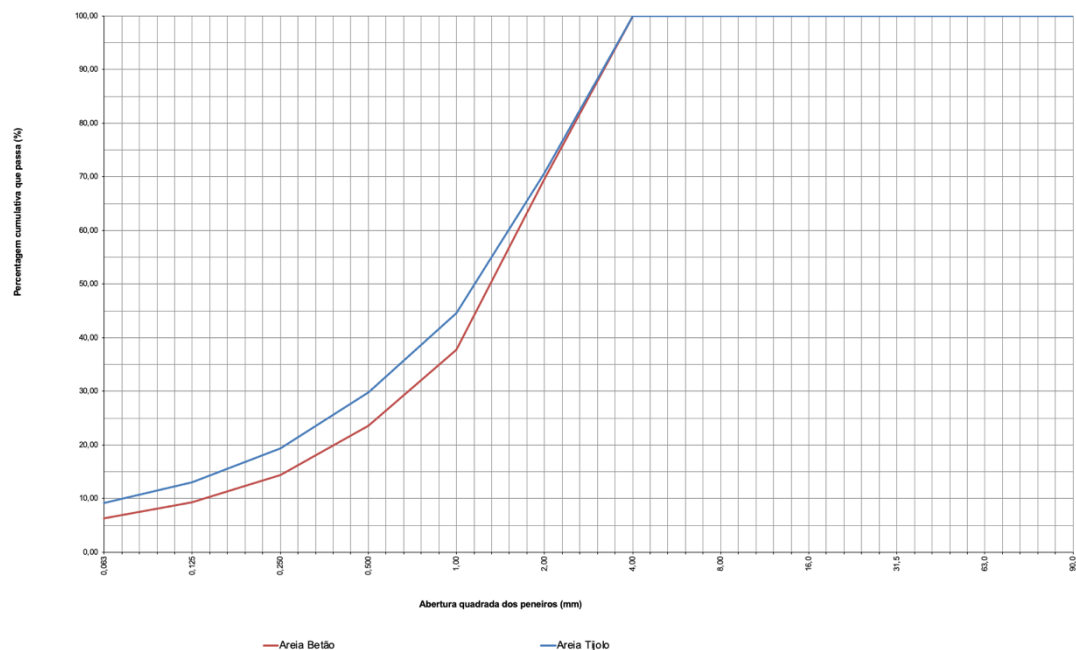


Figura 117 - Curvas granulométricas de areia de betão e areia de tijolo, comparação dos agregados

4.9. Conclusões

Este trabalho pretende demonstrar o potencial de resíduos como os RCD, para o desenvolvimento de uma paleta de materiais para 3DP. Contribui para a transição para uma cadeia de abastecimento mais sustentável, reduzindo a destruição dos leitos dos rios com a extração de areia do rio. Além disso, ao utilizar RCD, como areia de tijolo, com alternativas cromáticas, as possibilidades estéticas no 3DPC são aumentadas. Com a inclusão deste agregado com cimento branco foi possível obter várias cores.

Como referido no início deste capítulo, para que um material cimentício possa ser impresso em 3D há pelo menos 3 requisitos que este tem que cumprir: *workability*, *extrudability* e *buildability*. Estas condições foram todas testadas exaustivamente ao longo deste capítulo, de forma a perceber qual a mistura ideal de materiais. Os testes foram divididos em 6 fases e as conclusões de cada uma delas serão apresentadas infra.

A primeira fase de testes, os testes dos acabamentos de argamassas com adição de agregados reciclados, serviu para fazer as primeiras experiências relativas à materialidade, compreender as diferenças entre as duas cores (cinza e branco) de cimento, aglomerar todos os componentes na argamassa seca e compreender vantagens e desvantagens da adição de vidro. Após terem sido realizados 3 testes, o único objetivo alcançado foi a aglomeração de componentes, pois, de resto, as amostras revelaram-se frágeis ao desmoldar, o vidro passava despercebido em todas as amostras e o cimento cinza mostrou-se demasiado “opaco” para o RCD utilizado ser visível. Com base nestas conclusões, definiu-se para a fase seguinte algumas melhorias, como o controlo da dimensão do agregado de vidro, os testes de outros RCD para além do vidro (azulejo e tijolo) e a utilização exclusiva de cimento branco, para destacar os agregados.

Na segunda fase de testes, testagem dos acabamentos de argamassas apenas com agregados reciclados de granulometria 3-4 mm, houve melhorias significativas. Pois para além de boa aglomeração dos componentes, o vidro era facilmente perceptível na amostra de argamassa seca. Por outro lado, os novos RCD, azulejo e tijolo, tiveram resultados opostos. No caso do azulejo, para além de ser um material difícil de trabalhar, não acrescentou qualquer valor estético à argamassa. Já o tijolo, apesar de ter conferido pouca resistência, deixou a sua marca na argamassa através do pigmento alaranjado que deixou na amostra seca. Sendo a estética do material um objetivo constante ao longo de todos os testes desenvolvidos, passou-se para uma nova fase de testes com foco na capacidade de extrusão do material, para que este possa ser impresso em 3D.

Numa terceira fase de testes, os testes da extrusão das argamassas, foram desenvolvidas diversas variações de argamassa. Foram testados diferentes rácios entre cimento-RCD, diferentes granulometrias de RCD e múltiplos materiais (vidro, tijolo, agregado de cortiça, pneu e plástico, poliestireno expandido, cortiça negra e carvão). O objetivo era perceber qual o RCD que tinha o melhor comportamento tanto na trabalhabilidade do material como na extrusão de filamento. Após os testes de *extrudability*, os materiais que se mantiveram no foco desta dissertação foram o vidro e o tijolo. Apesar dos outros RCD terem algum valor estético, principalmente pela cor, são matérias-primas complicadas de trabalhar e de aglomerar com o cimento. Sendo um dos objetivos principais desta tese criar uma argamassa usando desperdícios de construção, numa próxima fase, tentar-se-á usar a menor percentagem de cimento possível.

A quarta fase de testes, os testes da extrusão das argamassas desenvolvidas com redução de cimento, serviu para perceber que o tijolo iria ser o RCD de principal aposta daí para a frente, pois, para além de ter sido o material com melhor desempenho em todos os testes, é

III. Caso de Estudo

aquele que mais vantagens estéticas traz à argamassa final. Assim, os testes que se seguiram foram os de *buildability*, apenas com tijolo.

Na quinta fase de testes, os testes de *buildability* das argamassas desenvolvidas com redução de cimento, concluiu-se que o suporte de camadas era possível, contudo só era conseguido através de um rácio, com um mínimo de 15% cimento e 85% de tijolo em pó. Na última fase de testes, os testes de argamassas desenvolvidas com areia reciclada, foram aplicados todos os conhecimentos adquiridos até este ponto para testar os RCD eleitos, vidro e tijolo, em formato de areia (com granulometria igual ou inferior a 4 mm). Foi também integrado nesta fase um novo RCD, o betão. Foi estudada a extrudabilidade das argamassas desenvolvidas com três tipos de areia reciclada e o principal objetivo era reduzir, ao máximo, a quantidade de cimento na argamassa. Com estes testes tornou-se possível acrescentar à lista de materiais testados o betão e concluir que este é também um material viável.

Os rácios com as diferentes areias foram definidos pelos testes que mostraram melhor consistência na argamassa, capacidade de extrusão e extensão do filamento. Assim, com base nesses testes, estimou-se como rácio “ideal” cimento-RCD, a ser usado em testes futuros com outros materiais, 60% de cimento branco com 40% de areia, pois todas as misturas foram imprimíveis com este rácio. Sendo o tijolo, o resíduo que acabou por mostrar acrescentar mais vantagens à argamassa final, foi testada a sua paleta cromática.

Neste capítulo definiu-se o tijolo como RCD eleito para testes de *printability* no próximo capítulo.

5. Desenvolvimento do Produto

Tendo em consideração toda a investigação feita até ao momento, este capítulo dedicou-se essencialmente ao desenvolvimento de um painel customizável por estudos de modelação 3D, de forma a encontrar a peça ideal para a impressão com o material desenvolvido.

A ideia inicial passou por se imprimir um painel de autorretrato. Ideia esta que foi posta de parte devido à falta de detalhe conseguido pela impressora.

Ainda com o objetivo de imprimir painéis, pensou-se na impressão de um painel geométrico com inspiração nas fachadas árabes, algo semelhante a tijolo vazado. Esta segunda ideia, não teve, mais uma vez, continuidade. Uma vez que o resultado final, por ter formas geométricas simples, é conseguido com mais facilidade através de moldes, a impressão 3D de algo deste género não revelaria valor acrescido.

Por fim, abandonou-se completamente a ideia de imprimir um painel. Decidiu-se, então, realizar uma peça mais simples, com linhas orgânicas, que não fosse possível de se conseguir com moldes. Assim a peça impressa teve como inspiração a jarra Alvar Aalto.



Figura 118 - Jarra Alvar Aalto

5.1. Estudos

Modelação do Painel

Como referido anteriormente, a primeira abordagem tinha como objetivo a impressão 3D de um painel autobiográfico. Sendo que numa primeira instância, seguiu-se uma inspiração nos painéis de Vhils.

III. Caso de Estudo



Figura 119 - Painel Vhils em Cortiça (<https://www.apcor.pt/entrevista-a-vhils-alexandre-farto/>)

Para o efeito, o primeiro passo foi realizar um levantamento de forma à face da autora desta dissertação, no Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços (LDPS) utilizando a ferramenta *Sense* (fig. 120). Seguidamente, com recurso ao *SolidWorks* retocou-se (fig. 121) de forma que esta é apropriada para a impressão de um painel de 30x30 cm, simplificando algumas linhas e retirando detalhe (fig. 122).



Figura 120 - Scanner utilizado (*Sense*)



Figura 121 - Modelação obtida através do scan



Figura 122 - Modelação 3D retocada no solidworks

Apesar desta simplificação da modelação, o retrato conseguido no painel continua a demonstrar um detalhe e uma complexidade de níveis demasiado elevados para ser impresso em argamassa.

De forma a tentar ultrapassar este obstáculo, abandonou-se o intuito de produzir uma representação da face fiel à realidade, criando uma ilustração da face em perfil. De forma a antecipar a falta de detalhe da impressora optou-se por fazer essa mesma ilustração através de camadas. Como observado na figura 123, cada camada estaria associada a uma cor facilitando a perceção da sobreposição de camadas que acontece numa impressão 3D. Seguindo esta lógica, procedeu-se à modelação desta ilustração através do *Tinkercad*, um programa online gratuito. O resultado desta modelação, observável na figura 124, parecia apta para prosseguir à impressão, contudo, foi necessário realizar mais testes para perceber o detalhe que esta implicava.

III. Caso de Estudo



Figura 123 - Ilustração que dará origem ao painel

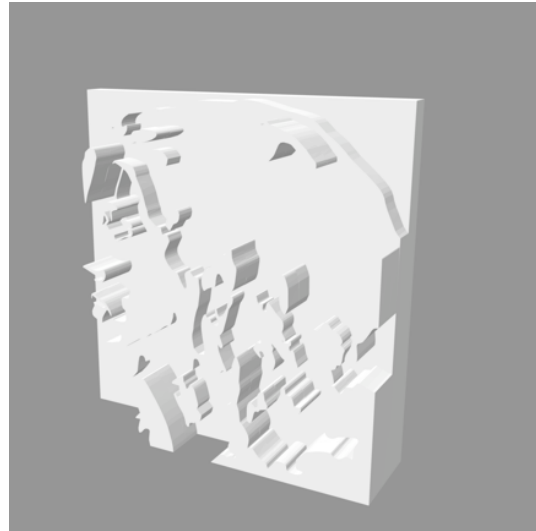


Figura 124 - Modelo 3D do painel autobiográfico

Estudos com plasticina

Uma vez que a modelação 3D do painel autobiográfico estava definida, decidiu-se realizar um teste de simulação de impressão com recurso a plasticina. Simulação esta que foi feita por camadas, utilizando um filamento de, aproximadamente, 2 milímetros (fig. 125, fig. 126 e fig. 127). O resultado deste estudo foi positivo e a impressão com argamassa parecia possível, com possível perda de detalhe em alguns pontos da ilustração: olho, nariz e boca.



Figura 125 - Modelo em plasticina (camada 1)



Figura 126 - Modelo em plasticina (camada 2)



Figura 127 - Modelo em plasticina (camada 3)

Impressão 3D em PLA

Após o sucesso da simulação da impressão em plasticina, antes de se passar à tentativa de impressão do painel em argamassa, decidiu-se explorar melhor o detalhe da modelação com a impressão da mesma em plástico. A primeira experimentação foi feita em PLA numa

III. Caso de Estudo

impressora Creality Ender 3 v2 com redução do tamanho do painel para 1/3 do tamanho definido, isto é, 10x10 cm (fig. 128).

Com o painel impresso verificou-se que este aparentava apresentar demasiado detalhe para a impressão final. Assim, procedeu-se a mais uma impressão em PLA, desta vez numa impressora, prusa MK3s, com mais precisão num painel com, agora, 45% do tamanho pretendido (fig. 129), novamente no LDPS.

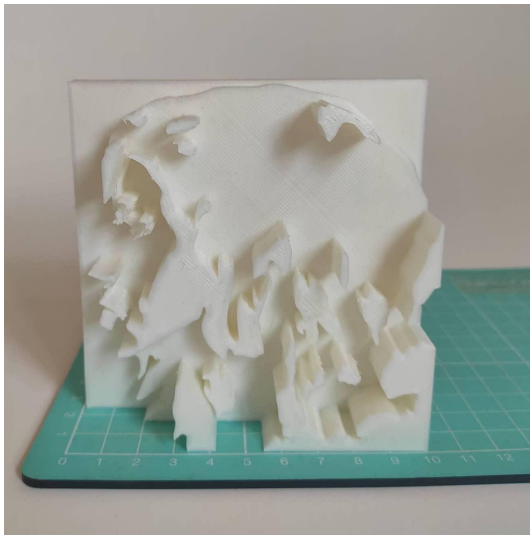


Figura 128 - Impressão 1/3 do tamanho do painel

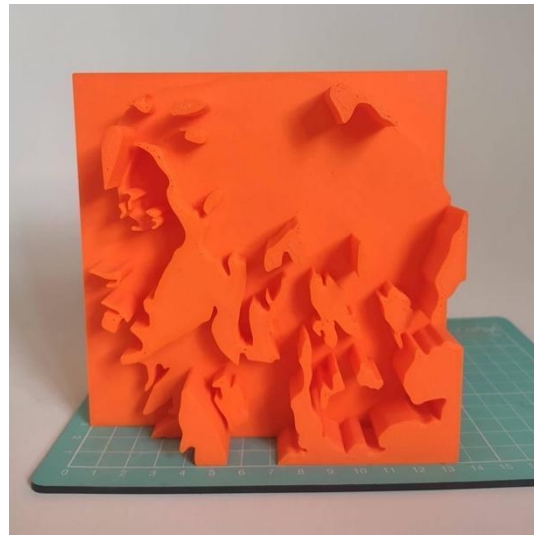


Figura 129 - Impressão 45% do tamanho do painel

Depois desta impressão percebeu-se que com o tamanho definido (30x30 cm) para o painel seria impossível de garantir o detalhe pretendido na impressora de betão. Para tal, o painel desenhado teria que ter uma dimensão de mais de 2m.

Modelação painel geométrico

Uma vez que a complexidade dos painéis experimentados anteriormente se revelou demasiado elevada, outro rumo teve de ser tomado.

Mantendo, ainda, a ideia de produzir um painel de 30x30 cm, e, adicionando o facto de o material escolhido para a impressão ter pigmento de tijolo, decidiu-se criar algo semelhante a tijolo vazado com inspiração nas fachadas árabes. Para o efeito, modelaram-se diferentes tipos de painéis com linhas simples e geométricas (fig. 130, fig. 131 e fig. 132).

III. Caso de Estudo

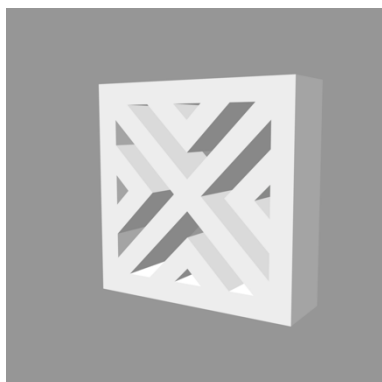


Figura 130 - Modelação Painel 1



Figura 131 - Modelação Painel 2

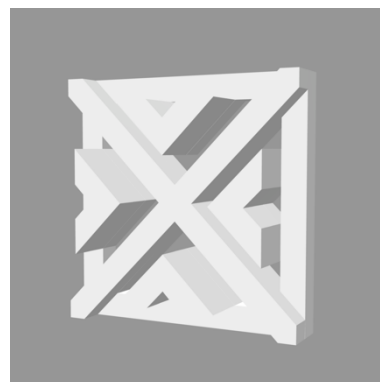


Figura 132 - Modelação Painel 3

Esta experiência quanto à possibilidade de ser impressa em argamassa, contudo, por se tratar de linhas de tal forma simplificadas, a impressão 3D de painéis deste género não acrescentaria valor, uma vez que poderiam ser mais facilmente obtidos através de moldes, com custos inferiores. Com este teste, percebeu-se ainda que um ponto intermédio de complexidade seria o ideal para este problema.

Modelação Final

Como referido anteriormente, a peça a ser impressa não poderia ser nem de complexidade muito elevada, o que impossibilitaria a impressão com o detalhe pretendido, nem de complexidade muito reduzida, onde o uso de moldes fosse mais proveitoso.

Assim, de forma a colmatar as falhas das ideias anteriores, decidiu-se abandonar por completo a ideia de produzir um painel e optou-se por tomar um novo rumo: a criação de uma peça.

Os esboços desta peça implicaram linhas curvas e orgânicas tirando o maior proveito possível do movimento da impressora e de forma a minimizar a perceção de transição entre camadas. De forma a garantir que esta peça não fosse possível de ser impressa através de moldes, desenvolveu-se a mesma com uma forma afunilada, isto é, da base para o topo, camada por camada, a peça foi estreitando (fig. 133, fig. 134 e fig. 135).

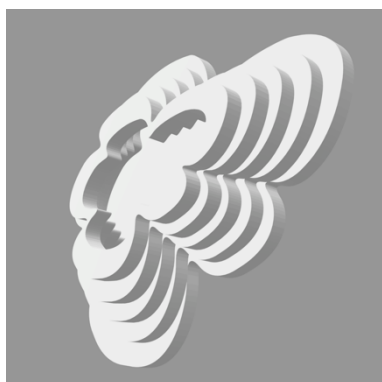


Figura 133 - Modelação Peça 1

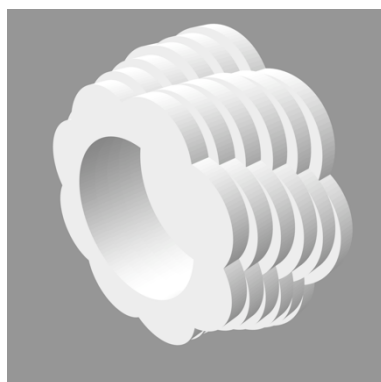


Figura 134 - Modelação Peça 2

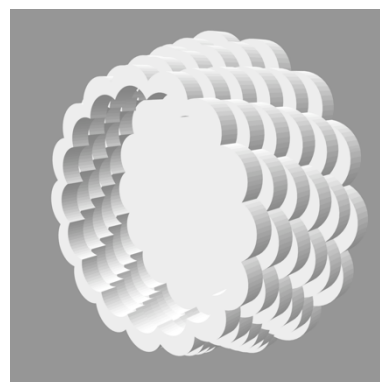


Figura 135 - Modelação Peça 3

Os esboços feitos numa primeira instância, apresentados acima, não correspondiam ao nível estético pretendido para esta dissertação. Com o intuito de criar uma peça que detivesse harmonia com o material escolhido, tomou-se a decisão de utilizar, como fonte de

III. Caso de Estudo

inspiração, a famosa jarra de Alvar Aalto (Savoy Vase). Utilizando as suas linhas, inverteu-se o sentido do crescimento do corpo da jarra entre a base e o topo, isto é, ao contrário da original em que da base para o topo a mesma vai alargando, o design proposto vai estreitando.

A modelação 3D desta peça foi conseguida através da utilização do Tinkercad, um software CAD 3D online e gratuito.

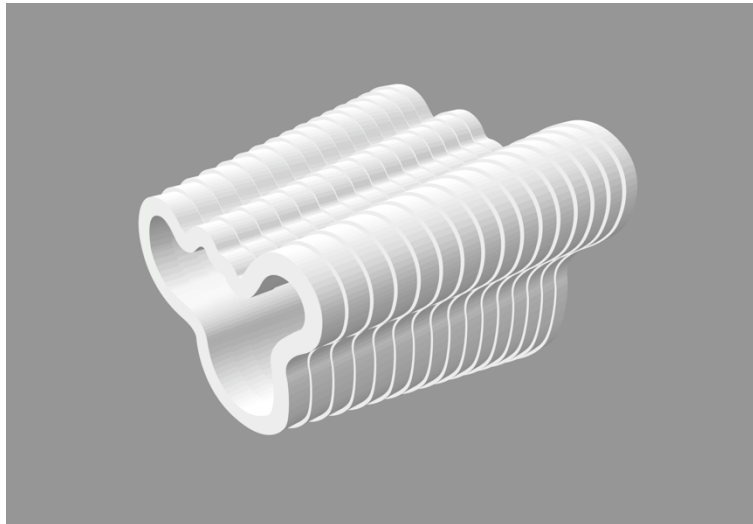


Figura 136 - Modelação final

5.2. Impressão Final

Preparação da peça para impressão

Esta etapa exigiu um elevado número de etapas, devido ao sistema e à impressora utilizada não estarem completamente preparados para 3DP com argamassas cimentícias.

Para transformar o modelo 3D, previamente feito, num caminho que conseguisse ser lido pela impressora (código G), foi utilizado um software de corte feito para impressoras 3D FDM, o Ultimaker Cura. Este é o software de impressão 3D mais popular do mundo, prepara impressões de forma rápida, integra softwares CAD para um trabalho mais fácil e contém configurações personalizadas. Apesar de ser uma boa solução para materiais poliméricos, quando usado com materiais cimentícios surgem alguns problemas relacionados com a definição de impressão e propriedades do material. Após a obtenção do ficheiro em código G, foi feita uma edição manual assegurando que a extrusora iniciava e terminava a impressão sempre no mesmo local, garantindo que o material seria extrudido nas mesmas condições em toda a peça. Para confirmar que a edição do código G foi feita corretamente, foi utilizado o software CAMotics para simular a impressão e esta foi assegurada. Finalmente, a velocidade de impressão e a altura do bico foram fixadas (velocidade: 100 mm/s; altura do bico: 15 mm na primeira camada e indo até 10 mm nas camadas seguintes).

III. Caso de Estudo

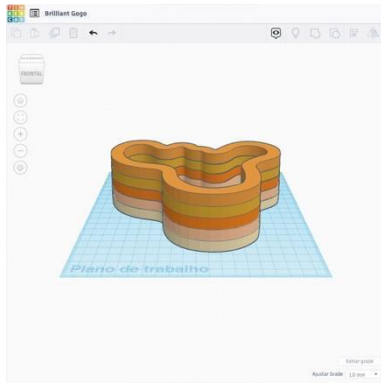


Figura 137 - Modelação 3D no Tinkercad

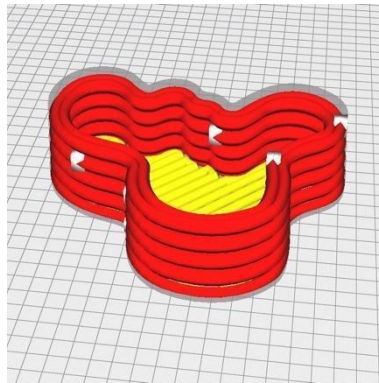


Figura 138 - Transformação da modelação 3D para código G no software Ultimaker Cura

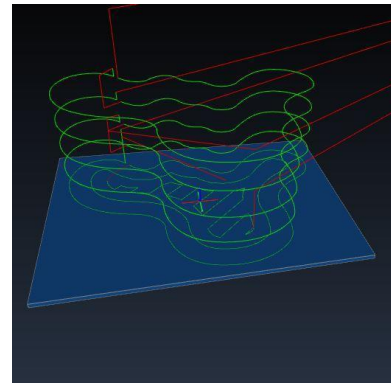


Figura 139 - Edição do código G através do CAMotics

Material

Com base nos testes realizados durante o plano experimental sabia-se que os melhores rácios de material andavam entre os 50% cimento - 50% de tijolo e 70% cimento - 30% de tijolo (percentagem em sólidos).

Tendo em consideração esses rácios na argamassa para impressão, o primeiro ensaio foi feito utilizando uma composição com uma percentagem de sólidos de 38% areia de tijolo e 62% cimento e uma percentagem total de 29% de areia de tijolo, 48% de cimento e 23% de água.

Componentes:

- 773g de areia tijolo;
- 1266g de cimento SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R;
- 619ml de água.

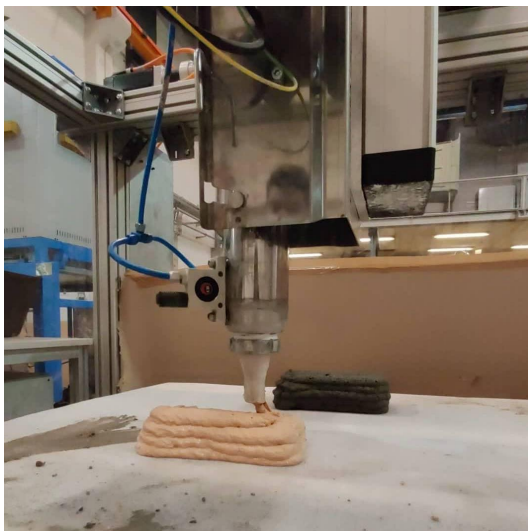


Figura 140 - Impressão do paralelepípedo



Figura 141 - Protótipo depois de seco

III. Caso de Estudo

O protótipo do paralelepípedo (fig. 141), para teste de material, apresentou uma capacidade de construção adequada (manteve a sua forma após a extrusão, enquanto suportava o peso das camadas superiores) e o processo de extrusão ocorreu continuamente sem entupir o sistema de impressão, o que significava que a mistura tinha capacidade de fluxo suficiente para ser extrudada. Assim para a impressão final decidiu-se manter as percentagens dos componentes apenas aumentando as quantidades. A peça foi impressa utilizando uma composição com uma percentagem de sólidos de 38% areia de tijolo e 62% cimento e uma percentagem total de 29% de areia de tijolo, 48% de cimento e 23% de água.

Componentes:

- 2319g de areia de tijolo;
- 3798g de cimento SECIL LUMEN BRANCO CEM II/B-L 32.5R;
- 1857ml de água.

A composição utilizada tanto no protótipo como na impressão final foi semelhante às testadas no plano experimental, contudo, devido a um aumento da pressão de extrusão, fornecida pela extrusora mecânica, foi possível diminuir o teor de água em 10%. Esta otimização do material é sugerida por Ma et al. (inserir referencia).

Impressão

Uma vez que o teste de impressão do material funcionou, pode-se passar para a impressão final da peça. Esta peça, como anteriormente explicado, teve como inspiração a jarra Alvar Aalto. Foram impressas 5 camadas, 1 camada de base e 4 de contorno, ficando a peça com uma altura aproximada de 7 cm. Entre camadas estas vão afunilando 0,5 cm em relação à anterior, para o interior da peça, estreitando a peça à medida que esta vai crescendo.



Figura 142 - Impressão da peça final



Figura 143 - Peça acabada de imprimir



Figura 144 - Peça depois de seca

Durante o processo de secagem consegue-se perceber que a cor alaranjada, dada pela areia de tijolo, vai perdendo a intensidade. Contudo a peça, final seca, apresenta na mesma alguma tonalidade cromática.

III. Caso de Estudo



Figura 145 - Peça final

5.3. Proposta de aplicação futura

Considerando todos os conhecimentos adquiridos até aqui, todos os estudos de modelação realizados e principalmente depois dos testes de impressão executados decidiu-se repescar a ideia de desenvolver um painel customizável. Uma vez que se conseguiu provar que o material está apto para impressão, tendo sido possível imprimir uma peça com 5 camadas de filamento, com uma altura de, aproximadamente, 7 cm, considerou-se voltar a desenvolver um painel de autorretrato. Para tornar as modelações diferentes entre si, optou-se por desenvolver uma ilustração facial.

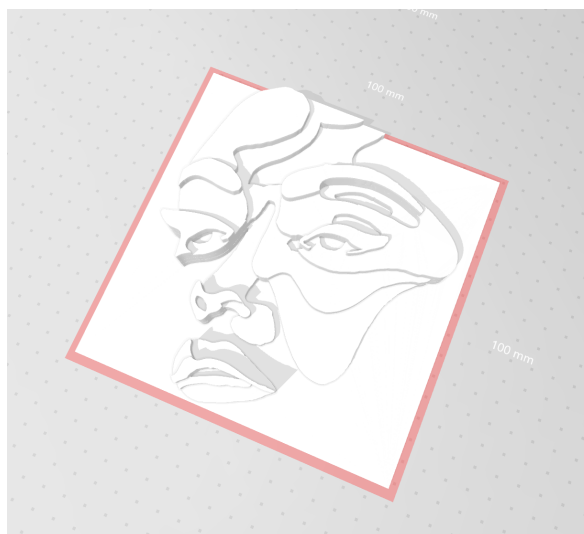


Figura 146 - Modelação Painel com Ilustração

III. Caso de Estudo

O objetivo com esta nova modelação era testar o material não só num painel customizado, mas também, numa peça com volumetria e detalhe, de forma a explorar algumas das especificidades do 3DP. Pretendia-se mostrar algumas das vantagens da impressão fase à pré-fabricação através da complexidade da peça. Infelizmente com o atraso da chegada da impressora às instalações da FEUP tal não foi possível. Assim a impressão (fig. 147) foi novamente feita em PLA numa impressora prusa MK3s, do LDPS, com tamanho de 15x15 cm.

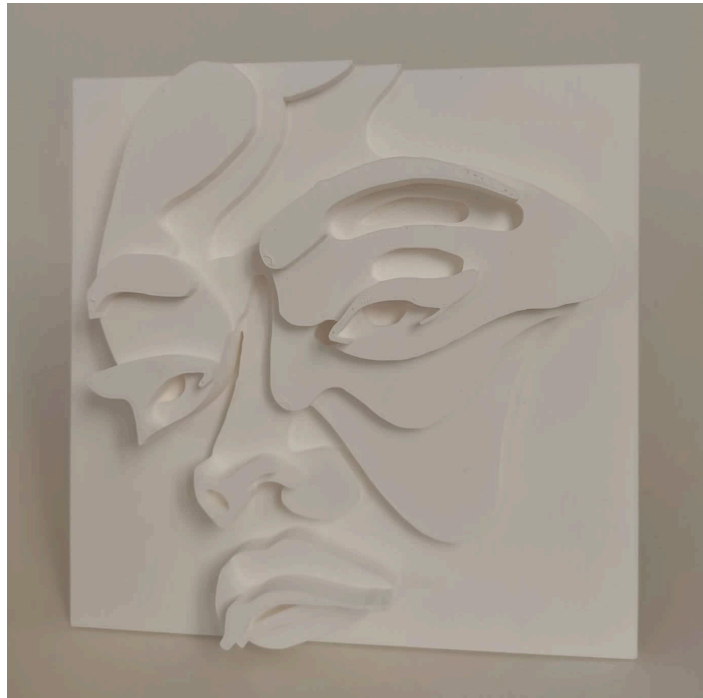


Figura 147 - Impressão em PLA do painel ilustrativo

De forma a aperfeiçoar a investigação desenvolvida e de forma a dar-lhe continuidade, o principal objetivo futuro será realizar a impressão 3D desta peça com o material cimentício desenvolvido nesta dissertação.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Conclusões

Esta dissertação surgiu com o propósito de criar uma argamassa sustentável, com valor estético e que fosse imprimível para a criação de peças de design em 3DP. Assim, procurou-se perceber o valor de cada Resíduo de Construção e Demolição, isto é, que vantagens acrescentam à argamassa final.

Para compreender como se podiam alcançar os objetivos definidos, começou por se fazer um estudo teórico que consistiu numa análise que suportasse a parte prática que mais tarde seria realizada. Foram explorados diferentes tipos de impressão 3D, diversas formas de criação de uma argamassa mais sustentável e as características que esta requeria para ser imprimível. Foram estudados, também, diferentes tipos de RCD, onde e como poderiam ser aplicados, e teve-se em consideração algumas aplicações já existentes.

Com os objetivos definidos e a pesquisa concluída, iniciou-se o plano experimental. Foram realizados diversos testes, testes de *workability*, onde se analisou a trabalhabilidade da mistura, *extrudability*, capacidade de extrusão de um filamento de material e *buildability*, sobreposição dos filamentos em camadas. Todos estes testes serviram para experimentar diversos RCD para no final se selecionar qual o que apresentava características mais interessantes. Foram realizados testes com 3 areias de RCD diferentes, betão, tijolo e vidro, foi sendo reduzida a percentagem de cimento na mistura

para avaliar quais aquelas que tinham ou não capacidade de impressão. O resíduo que teve melhores resultados foi o tijolo, pois provou ter um vasto leque cromático, através do tom alaranjado que dá à argamassa seca. Foi também o material que durante o período de testes mostrou melhor consistência na argamassa, extrusão e filamento. Os rácios de cimento-areia, com as diferentes areias, foram definidos pelos testes anteriores, que mostraram melhor consistência, capacidade de extrusão e extensão do filamento da argamassa. Assim, com base nos testes de *extrudability*, estimou-se como rácio “ideal” RCD-cimento era 40% de areia com 60% de cimento branco, pois todas as misturas foram imprimíveis com este rácio. O rácio normal de areia-cimento para betão é aproximadamente 80% de areia, 20% de cimento.

De forma a validar a mistura desenvolvida, com 60% de cimento e 40% de areia tijolo, partiu-se por fim para o último teste, *printability*, capacidade de impressão da argamassa. Para este teste ser possível foi proposta uma peça, com inspiração na jarra Alvar Aalto, com um design de linhas simples e orgânicas para facilitar a impressão.

A peça desenvolvida validou os objetivos desta dissertação: criar uma argamassa, substituindo na totalidade a areia natural por areia de RCD, reduzindo a quantidade de cimento utilizado, capaz de ser utilizada em impressão 3D de materiais cimentícios e com valor estético. Com isto é possível afirmar que esta investigação teve sucesso e que provou o potencial dos resíduos, como os RCD, para o desenvolvimento de uma nova paleta de materiais para 3DP. Contribui para a transição para uma cadeia de abastecimento mais sustentável, reduzindo a destruição dos leitos dos rios com a extração da areia dos rios na criação de argamassas aptas para 3DP.

Conformada a capacidade de impressão do material decidiu-se trazer de volta a ideia inicial da criação de um painel customizável e desenvolveu-se uma nova modelação, não em auto retrato mas, com uma ilustração de uma cara. A utilização de impressão para o

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

desenvolvimento deste tipo de peças é benéfica, uma vez que se conseguem alcançar detalhes e volumetrias não conjugáveis noutra tipo de fabrico. Lamentavelmente este painel apenas pode ser impresso em PLA, mas fica como plano futuro no desenvolvimento deste projeto com o material desenvolvido.

Esta tese pode ser uma mais-valia na criação de peças 3D, de design, com reaproveitamento de resíduos. Contudo esta investigação deixou muito por explorar e no próximo capítulo serão expostas algumas limitações e propostas futuras.

2. Limitações e Perspetivas Futuras

Apesar do conhecimento adquirido ao longo desta dissertação, ficou muito por explorar e por investigar: testes que ficaram por fazer, resíduos por experimentar, características por avaliar.

O projeto deparou-se com algumas limitações, e, apesar dos primeiros resultados serem positivos e motivadores, houve testes que ficaram por fazer, nomeadamente ensaios mecânicos. Estes testes são essenciais para caracterizar o material de forma mais completa e exata, pois ajudam determinar a resistência e durabilidade do material desenvolvido.

Assim no futuro, para além de ensaios mecânicos sugere-se:

- Que seja realizada uma avaliação do ciclo de vida do material, para que se possa comprovar se a utilização de agregados de tijolos reciclados é verdadeiramente mais sustentável para pigmentar a argamassa, do que a utilização de corantes naturais;
- Realização de mais testes de *printability*;
- Utilização do material no desenvolvimento de peças mais complexas e com mais camadas.

Para além de todas estas propostas, podem sempre ser desenvolvidas mais formulações de materiais, tentando sempre reduzir ao máximo a quantidade de cimento e substituindo a areia natural por qualquer tipo de resíduo. O foco e desenvolvimento futuro deste projeto, qualquer que seja, deverá sempre manter um carácter sustentável.

Referências

- Almeida, I. N. De, & Mpressão, I. (2021). *Isadora Nunes de Almeida*.
- Azevedo, A. R. G., Cecchin, D., Carmo, D. F., Silva, F. C., Campos, C. M. O., Shtrucka, T. G., Marvila, M. T., & Monteiro, S. N. (2020). Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5942–5952. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.122>
- Barros, H. T. G. de. (2017). *Resíduos de Construção e Demolição : Aspectos e Diretrizes*.
- Baudet, E., Ledemi, Y., Larochele, P., Morency, S., & Messaddeq, Y. (2019). 3D-printing of arsenic sulfide chalcogenide glasses. *Optical Materials Express*, 9(5), 2307. <https://doi.org/10.1364/ome.9.002307>
- Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, R. D.-S. (2017). 3D Printed Transparent Glass. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adma.201701181>.This
- Gato, A. F. (2017). *Design e vidro: a herança da industria nacional da Marinha Grande*. 261. https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/34899/2/ULFBA_TES1153_AURORA_GATO_6823.compressed.pdf
- GIRARDI, A. C. C. (2020). Avaliação da substituição total de areia natural por RCC em argamassa de assentamento. *Revista de Arquitetura IMED*, 9(2), 173. <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2020.v9i2.4003>
- How recycled glass bottles are helping build Victoria's roads of the future*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://www.youtube.com/watch?v=qzz8AATyaAg>
- Introducing the Glass Hallmark - FEVE*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://feve.org/>
- Jorge de Brito. (2006). *A Reciclagem na Casa do Futuro - Reciclagem de resíduos da construção e demolição*. March 2006.
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., & Oxman, N. (2015). Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 92–105. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0021>
- Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T. M., Richter, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2017). Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature*, 544(7650), 337–339. <https://doi.org/10.1038/nature22061>
- Lipor | Polígrafo da Reciclagem - Lipor*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://www.lipor.pt/pt/perguntas-frequentes/o-poligrafo-da-reciclagem/faq-126/>
- Malaeb, Z., AISakka, F., & Hamzeh, F. (2019). Chapter 6: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups. In *3D Concrete Printing Technology* (pp. 115–136).

- Montreal's Darwin bridge construction project uses recycled glass - Montreal | *Globalnews.ca*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://globalnews.ca/news/7410172/montreal-recycled-glass-bridge-project/>
- Nerella, V. N., Krause, M., & Mechtcherine, V. (2020). Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. *Automation in Construction*, 109(November), 2019–2020. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102986>
- Oliveira, L. A. P. De. (2008). *Mechanical and Durability Properties of Concrete with Ground Waste Glass Sand*. May.
- Oswaldo Luiz Alves, I. de F. G. e I. O. M. N. (1986). Vidros. *Perspectiva*, 3(6), 101.
- Panda, B., & Tan, M. J. (2019). Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application. *Materials Letters*, 237(November), 348–351. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.131>
- Portugal na média da UE na reciclagem de plásticos e fraco no papel e vidro | *Mais Europa* | PÚBLICO. (n.d.). Retrieved August 28, 2021, from <https://www.publico.pt/2018/11/29/sociedade/noticia/portugal-media-ue-reciclagem-plasticos-fraco-papel-vidro-1852912>
- Teixeira, J. H. S. (2018). *Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios*.
- Ting, G. H. A., Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(4), 994–1003. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00857-x>
- Zaki, R. M., Strutynski, C., Kaser, S., Bernard, D., Hauss, G., Faessel, M., Sabatier, J., Canioni, L., Messaddeq, Y., Danto, S., & Cardinal, T. (2020). Direct 3D-printing of phosphate glass by fused deposition modeling. *Materials and Design*, 194, 0–8. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108957>
- Zou, S., Xiao, J., Ding, T., Duan, Z., & Zhang, Q. (2021). Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand. *Construction and Building Materials*, 273, 121699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121699>
- Adamson, M., Razmjoo, A., & Poursaee, A. (2015). Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 94, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056>
- Azevedo, A. R. G., Cecchin, D., Carmo, D. F., Silva, F. C., Campos, C. M. O., Shtrucka, T. G., Marvila, M. T., & Monteiro, S. N. (2020). Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5942–5952. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.122>
- Braga, A. (2015). *Impacte ambiental comparado do ciclo de vida de betão com agregados grossos reciclados e naturais*.
- Diagrammatic representation of a Binder Jetting 3D Printer*. (n.d.). Retrieved February 21, 2022, from <https://manufactur3dmag.com/binder-jetting-works/>
- Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, R. D.-S. (2017). 3D Printed Transparent Glass. *Angewandte Chemie International*

- Edition*, 6(11), 951–952., 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adma.201701181>.This
- Durán, S. Q. (n.d.). *Analysis of silica fume and waste glass powder for sustainable concrete and mortar mixes, associate reactions, and alternative solutions*.
- Emerging Objects*. (n.d.). Retrieved January 18, 2022, from <http://emergingobjects.com/portfolio/>
- FDM extrusion Diagram*. (n.d.). Retrieved February 21, 2022, from <https://3dprintme.com.au/gallery/>
- Galeria Fotográfica, Sagrada Família*. (n.d.). Retrieved March 5, 2022, from <https://sagradafamilia.org/galeria-fotografica/>
- Gato, A. F. (2017). *Design e vidro: a herança da indústria nacional da Marinha Grande*. 261. https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/34899/2/UFLBA_TES1153_AURORA_GATO_6823.compressed.pdf
- How recycled glass bottles are helping build Victoria's roads of the future*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://www.youtube.com/watch?v=qzz8AATyaAg>
- Jorge de Brito. (2006). *A Reciclagem na Casa do Futuro - Reciclagem de resíduos da construção e demolição*. March 2006.
- Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T. M., Richter, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2017). Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature*, 544(7650), 337–339. <https://doi.org/10.1038/nature22061>
- Montreal's Darwin bridge construction project uses recycled glass - Montreal | Globalnews.ca*. (n.d.). Retrieved August 26, 2021, from <https://globalnews.ca/news/7410172/montreal-recycled-glass-bridge-project/>
- TAM*. (n.d.).
- Teixeira, J. H. S. (2018). *Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios*.
- XtreeE*. (n.d.). Retrieved January 18, 2022, from <https://xtreee.com/projects/>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Frimpong, B. E., Shariati, M., Mirmozaffari, M., & Boskabadi, A. (2021). Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124138>
- Zaki, R. M., Strutynski, C., Kaser, S., Bernard, D., Hauss, G., Faessel, M., Sabatier, J., Canioni, L., Messaddeq, Y., Danto, S., & Cardinal, T. (2020). Direct 3D-printing of phosphate glass by fused deposition modeling. *Materials and Design*, 194, 0–8. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108957>

Anexos

Anexo A - Tabela de Testes

Nº Teste	Tipo de Teste	RCD	Granulometria (mm)	RCD (g)	RCD (sólido %)	RCD (total %)	Areia (g)	Cal Hidráulica (g)	Cimento (cor)	Cimento (g)	Cimento (sólido %)	Cimento (total %)	Água ml	Água (Total %)	Água/Cimento
1	amostra	vidro âmbar	-	150	30,00	-	300	-	cinza	50	10,00	-	-	-	-
2	amostra	vidro âmbar	-	50	14,29	-	100	50	branco	50	12,50	-	-	-	-
3	amostra	vidro âmbar	-	200	50,00	-	200	-	branco	100	25,00	-	-	-	-
4	amostra	vidro verde	4-3mm	33	75,00	64,71	-	-	branco	11	25,00	21,57	7	13,73	0,64
5	amostra	azulejo	4-3mm	12	66,67	50,00	-	-	branco	6	33,33	25,00	6	25,00	1,00
6	amostra	tijolo	4-3mm	28	73,68	62,22	-	-	branco	10	26,32	22,22	7	15,56	0,70
7	-	vidro verde	4-3mm	80	74,77	66,12	-	-	branco	27	25,23	22,31	14	11,57	0,52
8	amostra	vidro verde	< 3mm	100	75,19	63,29	-	-	branco	33	24,81	20,89	25	15,82	0,76
9	-	vidro verde	< 1mm	55	75,34	64,71	-	-	branco	18	24,66	21,18	12	14,12	0,67
10	amostra/extrusão	vidro verde	< 1mm	60	66,67	50,00	-	-	branco	30	33,33	25,00	30	25,00	1,00
11	amostra/extrusão	vidro verde	4-3mm	60	60,00	50,00	-	-	branco	40	40,00	33,33	20	16,67	0,50
12	amostra/extrusão	vidro verde	< 4mm	25	50,00	40,32	-	-	branco	25	50,00	40,32	12	19,35	0,48
13	extrusão	vidro verde	4-3mm	20	40,00	30,77	-	-	branco	30	60,00	46,15	15	23,08	0,50
14	extrusão	vidro verde	3-2mm	18	25,35	18,27	-	-	branco	53	74,65	54,08	27	27,55	0,51
15	amostra/extrusão	tijolo	< 1mm	70	66,67	50,00	-	-	branco	35	33,33	25,00	35	25,00	1,00
16	amostra/extrusão	tijolo	4-3mm	30	33,33	28,57	-	-	branco	60	66,67	57,14	15	14,29	0,25
17	extrusão	tijolo	4-3mm	15	33,33	27,27	-	-	branco	30	66,67	54,55	10	18,18	0,33
18	amostra	aglomerado de pneu, plástico e cortiça	< 4mm	11	64,71	47,83	-	-	branco	6	35,29	26,09	6	26,09	1,00
19	amostra	cotiça negra	4-3mm	5	50,00	33,33	-	-	branco	5	50,00	33,33	5	33,33	1,00
20	amostra	cotiça negra	< 1mm	7	63,64	38,89	-	-	branco	4	36,36	22,22	7	38,89	1,75
21	amostra	esferovite azul	< 4mm	1	6,25	3,85	-	-	branco	15	93,75	57,69	10	38,46	0,67
22	amostra	carvão	4-3mm	12	33,33	20,00	-	-	branco	24	66,67	40,00	24	40,00	1,00
23	amostra/extrusão	carvão	< 1mm	20	66,67	28,57	-	-	branco	10	33,33	14,29	40	57,14	4,00
24	extrusão	tijolo	< 1mm	30	66,67	50,00	-	-	branco	15	33,33	25,00	15	25,00	1,00
25	extrusão	tijolo	< 1mm	34	85,00	61,82	-	-	branco	6	15,00	10,91	15	27,27	2,50
26	extrusão	tijolo	< 1mm	37	90,24	64,91	-	-	branco	4	9,76	7,02	16	28,07	4,00
27	extrusão	tijolo	< 1mm	38	95,00	65,52	-	-	branco	2	5,00	3,45	18	31,03	9,00
28	extrusão	tijolo	< 1mm	40	100,00	66,67	-	-	-	0	0,00	0,00	20	33,33	-
29	extrusão	tijolo	4-3mm	20	66,67	50,00	-	-	branco	10	33,33	25,00	10	25,00	1,00
30	-	tijolo	4-3mm	23	85,19	65,71	-	-	branco	4	14,81	11,43	8	27,86	2,00
31	extrusão	vidro âmbar	< 1mm	30	66,67	50,00	-	-	branco	15	33,33	25,00	15	25,00	1,00
32	extrusão	vidro âmbar	< 1mm	34	85,00	61,82	-	-	branco	6	15,00	10,91	15	27,27	2,50
33	extrusão	vidro âmbar	< 1mm	37	90,24	64,91	-	-	branco	4	9,76	7,02	16	28,07	4,00
34	-	vidro âmbar	4-3mm	20	66,67	50,00	-	-	branco	10	33,33	25,00	10	25,00	1,00
35	buildability	tijolo	< 1mm	75	75,00	53,57	-	-	branco	25	25,00	17,86	40	28,57	1,60
36	buildability	tijolo	< 1mm	85	85,00	58,62	-	-	branco	15	15,00	10,34	45	31,03	3,00
37	buildability	tijolo	< 1mm	90	90,00	62,07	-	-	branco	10	10,00	6,90	45	31,03	4,50
38	buildability	tijolo	< 1mm	95	95,00	65,52	-	-	branco	5	5,00	3,45	45	31,03	9,00
39	buildability	tijolo	< 1mm	100	100,00	66,67	-	-	-	0	0,00	0,00	50	33,33	-
40	-	betão (areia)	4mm	50	74,63	60,98	-	-	branco	17	25,37	20,73	15	18,29	0,88
41	-	betão (areia)	4mm	44	65,67	53,66	-	-	branco	23	34,33	28,05	15	18,29	0,65
42	-	betão (areia)	4mm	34	50,00	40,96	-	-	branco	34	50,00	40,96	15	18,07	0,44
43	extrusão	betão (areia)	4mm	27	40,30	31,76	-	-	branco	40	59,70	47,06	18	21,18	0,45
44	extrusão	betão (areia)	4mm	23	34,33	27,06	-	-	branco	44	65,67	51,76	18	21,18	0,41
45	extrusão	betão (areia)	4mm	17	25,37	19,54	-	-	branco	50	74,63	57,47	20	22,99	0,40
46	-	tijolo (areia)	4mm	50	74,63	57,47	-	-	branco	17	25,37	19,54	20	22,99	1,18
47	-	tijolo (areia)	4mm	44	65,67	45,36	-	-	branco	23	34,33	23,71	30	30,93	1,30
48	extrusão	tijolo (areia)	4mm	34	50,00	37,78	-	-	branco	34	50,00	37,78	22	24,44	0,65
49	extrusão	tijolo (areia)	4mm	27	40,30	30,34	-	-	branco	40	59,70	44,94	22	24,72	0,55
50	extrusão	tijolo (areia)	4mm	23	34,33	25,00	-	-	branco	44	65,67	47,83	25	27,17	0,57
51	-	vidro (areia)	4mm	50	74,63	60,98	-	-	branco	17	25,37	20,73	15	18,29	0,88
52	-	vidro (areia)	4mm	44	65,67	53,66	-	-	branco	23	34,33	28,05	15	18,29	0,65
53	extrusão	vidro (areia)	4mm	34	50,00	39,53	-	-	branco	34	50,00	39,53	18	20,93	0,53
54	extrusão	vidro (areia)	4mm	27	40,30	31,76	-	-	branco	40	59,70	47,06	18	21,18	0,45
55	extrusão	vidro (areia)	4mm	23	34,33	26,44	-	-	branco	44	65,67	50,57	20	22,99	0,45
56	cromático	tijolo	-	0	0,00	0,00	-	-	branco	10	100,00	71,43	4	28,57	0,40
57	cromático	tijolo	< 1mm	1	10,00	6,67	-	-	branco	9	90,00	60,00	5	33,33	0,56
58	cromático	tijolo	< 1mm	2	20,00	12,50	-	-	branco	8	80,00	50,00	6	37,50	0,75
59	cromático	tijolo	< 1mm	3	30,00	20,00	-	-	branco	7	70,00	46,67	5	33,33	0,71
60	cromático	tijolo	< 1mm	4	40,00	26,67	-	-	branco	6	60,00	40,00	5	33,33	0,83
61	cromático	tijolo	< 1mm	5	50,00	35,71	-	-	branco	5	50,00	35,71	4	28,57	0,80
62	cromático	tijolo	< 1mm	6	60,00	40,00	-	-	branco	4	40,00	26,67	5	33,33	1,25
63	cromático	tijolo	< 1mm	7	70,00	43,75	-	-	branco	3	30,00	18,75	6	37,50	2,00
64	cromático	tijolo	< 1mm	8	80,00	44,44	-	-	branco	2	20,00	11,11	8	44,44	4,00
65	cromático	tijolo	< 1mm	9	90,00	52,94	-	-	branco	1	10,00	5,88	7	41,18	7,00

Anexo B - Análise granulométrica da areia de betão

Análise Granulométrica de Agregados																																																																																		
Norma de referência:		NP 933-1 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração																																																																																
Requisição nº	Ti nº 12/20	Data de ensaio:	27/07/21																																																																															
Boletim nº																																																																																		
Referência da amostra: Areia de betão																																																																																		
procedimento usado:		<input checked="" type="checkbox"/> lavagem e peneiração	<input type="checkbox"/> peneiração a seco																																																																															
<input checked="" type="checkbox"/> Série Base	<input type="checkbox"/> Série Base + Série 1		<input type="checkbox"/> Série Base + Série 2																																																																															
M ₁ - Massa total da amostra seca	(kg)	0,2423																																																																																
M ₂ - Massa seca do material retido no peneiro 0,063mm após lavagem	(kg)	0,2286																																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Abertura dos peneiros (mm)</th> <th rowspan="2">Massa Retida (R_i) (kg)</th> </tr> <tr> <th>Série Base</th> <th>Série 1</th> <th>Série 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>90,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>80,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>75,0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>71,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>45,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>40,0</td><td></td></tr> <tr><td>31,5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>22,4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>20,0</td><td></td></tr> <tr><td>16,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>14,0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>12,5</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>11,2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>10,0</td><td></td></tr> <tr><td>8,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>6,3</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>5,6</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)	Série Base	Série 1	Série 2	90,0					80,0					75,0			71,0			63,0					45,0					40,0		31,5					22,4					20,0		16,0						14,0				12,5			11,2					10,0		8,0						6,3			5,6		
Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)																																																																															
Série Base	Série 1	Série 2																																																																																
90,0																																																																																		
	80,0																																																																																	
		75,0																																																																																
	71,0																																																																																	
63,0																																																																																		
	45,0																																																																																	
		40,0																																																																																
31,5																																																																																		
	22,4																																																																																	
		20,0																																																																																
16,0																																																																																		
		14,0																																																																																
		12,5																																																																																
	11,2																																																																																	
		10,0																																																																																
8,0																																																																																		
		6,3																																																																																
	5,6																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Abertura dos peneiros (mm)</th> <th rowspan="2">Massa Retida (R_i) (kg)</th> </tr> <tr> <th>Série Base</th> <th>Série 1</th> <th>Série 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4,00</td><td></td><td></td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>2,00</td><td></td><td></td><td>0,0740</td></tr> <tr><td>1,00</td><td></td><td></td><td>0,0767</td></tr> <tr><td>0,500</td><td></td><td></td><td>0,0344</td></tr> <tr><td>0,250</td><td></td><td></td><td>0,0222</td></tr> <tr><td>0,125</td><td></td><td></td><td>0,0125</td></tr> <tr><td>0,063</td><td></td><td></td><td>0,0072</td></tr> <tr><td>P</td><td></td><td></td><td>0,0002</td></tr> </tbody> </table>				Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)	Série Base	Série 1	Série 2	4,00			0,0000	2,00			0,0740	1,00			0,0767	0,500			0,0344	0,250			0,0222	0,125			0,0125	0,063			0,0072	P			0,0002																																								
Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)																																																																															
Série Base	Série 1	Série 2																																																																																
4,00			0,0000																																																																															
2,00			0,0740																																																																															
1,00			0,0767																																																																															
0,500			0,0344																																																																															
0,250			0,0222																																																																															
0,125			0,0125																																																																															
0,063			0,0072																																																																															
P			0,0002																																																																															
Validação dos resultados																																																																																		
ΣR _i +P	0,22720	1% M ₂	0,00																																																																															
M ₂ -(ΣR _i +P)	0,00	Ensaio Válido																																																																																
Os resultados são válidos se M ₂ -(ΣR _i +P) for inferior a 1% da massa M ₂																																																																																		
Observações:																																																																																		
Ensaio realizado por: _____																																																																																		

Referência da amostra:		Areia de betão			
M ₁ -	Massa total da amostra seca	(kg)	0,2		
M ₂ -	Massa seca do material retido no peneiro 0,063mm após lavagem	(kg)	0,2286		
	Massa seca de finos removidos por lavagem (M ₁ - M ₂)	(kg)	0,0137		
Abertura dos peneiros	Massa Retida (R _i)	Percentagem Retida	Percentagem retida acumulada	Percentagem acumulada passados	
(mm)	(kg)	(%)	(%)	(%)	
90,0	0,00	0,0	0,0	100,0	
63,0	0,00	0,0	0,0	100,0	
31,5	0,00	0,0	0,0	100,0	
16,0	0,000	0,0	0,0	100,0	
8,0	0,0000	0,0	0,0	100,0	
4,0	0,0000	0,0	0,0	100,0	
2,0	0,0740	30,5	30,5	69,5	
1,0	0,0767	31,7	62,2	37,8	
0,500	0,0344	14,2	76,4	23,6	
0,250	0,0222	9,2	85,6	14,4	
0,125	0,0125	5,2	90,7	9,3	
0,063	0,0072	3,0	93,7	6,3	
P	0,0002	0,1	93,8	6,3	
<i>f</i> -	Percentagem de finos	(%)	5,7E+00		
M ₃ -	Total retidos (ΣR _i +P)	(kg)	0,2		
	Perdas (M ₂ -M ₃)	(kg)	0,00		
	Perdas (M ₂ -M ₃)/M ₂ *100	(kg)	0,61		
	Teor Finos (M ₁ -M ₃ +P)	(kg)	0,0		

Anexo C - Análise granulométrica da areia de tijolo

Análise Granulométrica de Agregados																																																																																		
Norma de referência:		NP 933-1 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração																																																																																
Requisição nº	Ti nº 12/20	Data de ensaio:	27/07/21																																																																															
Boletim nº																																																																																		
Referência da amostra: Areia de tijolo																																																																																		
procedimento usado:	<input checked="" type="checkbox"/> lavagem e peneiração	<input type="checkbox"/> peneiração a seco																																																																																
<input checked="" type="checkbox"/> Série Base	<input type="checkbox"/> Série Base + Série 1	<input type="checkbox"/> Série Base + Série 2																																																																																
M ₁ - Massa total da amostra seca	(kg)	0,2392																																																																																
M ₂ - Massa seca do material retido no peneiro 0,063mm após lavagem	(kg)	0,2178																																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Abertura dos peneiros (mm)</th> <th rowspan="2">Massa Retida (R_i) (kg)</th> </tr> <tr> <th>Série Base</th> <th>Série 1</th> <th>Série 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>90,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>80,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>75,0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>71,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>45,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>40,0</td><td></td></tr> <tr><td>31,5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>22,4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>20,0</td><td></td></tr> <tr><td>16,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>14,0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>12,5</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>11,2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>10,0</td><td></td></tr> <tr><td>8,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>6,3</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>5,6</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)	Série Base	Série 1	Série 2	90,0					80,0					75,0			71,0			63,0					45,0					40,0		31,5					22,4					20,0		16,0						14,0				12,5			11,2					10,0		8,0						6,3			5,6		
Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)																																																																															
Série Base	Série 1	Série 2																																																																																
90,0																																																																																		
	80,0																																																																																	
		75,0																																																																																
	71,0																																																																																	
63,0																																																																																		
	45,0																																																																																	
		40,0																																																																																
31,5																																																																																		
	22,4																																																																																	
		20,0																																																																																
16,0																																																																																		
		14,0																																																																																
		12,5																																																																																
	11,2																																																																																	
		10,0																																																																																
8,0																																																																																		
		6,3																																																																																
	5,6																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Abertura dos peneiros (mm)</th> <th rowspan="2">Massa Retida (R_i) (kg)</th> </tr> <tr> <th>Série Base</th> <th>Série 1</th> <th>Série 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4,00</td><td></td><td></td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>2,00</td><td></td><td></td><td>0,0700</td></tr> <tr><td>1,00</td><td></td><td></td><td>0,0624</td></tr> <tr><td>0,500</td><td></td><td></td><td>0,0355</td></tr> <tr><td>0,250</td><td></td><td></td><td>0,0250</td></tr> <tr><td>0,125</td><td></td><td></td><td>0,0153</td></tr> <tr><td>0,063</td><td></td><td></td><td>0,0091</td></tr> <tr><td>P</td><td></td><td></td><td>0,0002</td></tr> </tbody> </table>				Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)	Série Base	Série 1	Série 2	4,00			0,0000	2,00			0,0700	1,00			0,0624	0,500			0,0355	0,250			0,0250	0,125			0,0153	0,063			0,0091	P			0,0002																																								
Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (kg)																																																																															
Série Base	Série 1	Série 2																																																																																
4,00			0,0000																																																																															
2,00			0,0700																																																																															
1,00			0,0624																																																																															
0,500			0,0355																																																																															
0,250			0,0250																																																																															
0,125			0,0153																																																																															
0,063			0,0091																																																																															
P			0,0002																																																																															
Validação dos resultados																																																																																		
ΣR _i +P	0,21750	1% M ₂	0,00																																																																															
M ₂ -(ΣR _i +P)	0,00	Ensaio Válido																																																																																
Os resultados são válidos se M ₂ -(ΣR _i +P) for inferior a 1% da massa M ₂																																																																																		
Observações:																																																																																		
Ensaio realizado por: _____																																																																																		

Referência da amostra:		Areia de tijolo		
M ₁ -	Massa total da amostra seca	(kg)	0,2	
M ₂ -	Massa seca do material retido no peneiro 0,063mm após lavagem	(kg)	0,2178	
	Massa seca de finos removidos por lavagem (M ₁ - M ₂)	(kg)	0,0214	
Abertura dos peneiros	Massa Retida (R _i)	Percentagem Retida	Percentagem retida acumulada	Percentagem acumulada passados
(mm)	(kg)	(%)	(%)	(%)
90,0	0,00	0,0	0,0	100,0
63,0	0,00	0,0	0,0	100,0
31,5	0,00	0,0	0,0	100,0
16,0	0,000	0,0	0,0	100,0
8,0	0,0000	0,0	0,0	100,0
4,0	0,0000	0,0	0,0	100,0
2,0	0,0700	29,3	29,3	70,7
1,0	0,0624	26,1	55,4	44,6
0,500	0,0355	14,8	70,2	29,8
0,250	0,0250	10,5	80,6	19,4
0,125	0,0153	6,4	87,0	13,0
0,063	0,0091	3,8	90,8	9,2
P	0,0002	0,1	90,9	9,1
f-	Percentagem de finos	(%)	9,0E+00	
M ₃ -	Total retidos (ΣR _i +P)	(kg)	0,2	
	Perdas (M ₂ -M ₃)	(kg)	0,00	
	Perdas (M ₂ -M ₃)/M ₂ *100	(kg)	0,14	
	Teor Finos (M ₁ -M ₃ +P)	(kg)	0,0	

Anexo D - Comparação dos agradados (areia de betão e tijolo)

	Areia Betão	Areia Tijolo	
Peneiros	Percentagem de acumulado passados	Percentagem de acumulado passados	Percentagem de acumulado passados
(mm)	(%)	(%)	(%)
0,063	6,30	9,20	
0,074	#N/D	#N/D	#N/D
0,088	#N/D	#N/D	#N/D
0,100	#N/D	#N/D	#N/D
0,113	#N/D	#N/D	#N/D
0,125	9,30	13,00	
0,150	#N/D	#N/D	#N/D
0,175	#N/D	#N/D	#N/D
0,200	#N/D	#N/D	#N/D
0,225	#N/D	#N/D	#N/D
0,250	14,40	19,40	
0,300	#N/D	#N/D	#N/D
0,350	#N/D	#N/D	#N/D
0,400	#N/D	#N/D	#N/D
0,450	#N/D	#N/D	#N/D
0,500	23,60	29,80	
0,600	#N/D	#N/D	#N/D
0,700	#N/D	#N/D	#N/D
0,800	#N/D	#N/D	#N/D
0,900	#N/D	#N/D	#N/D
1,00	37,80	44,60	
1,20	#N/D	#N/D	#N/D
1,40	#N/D	#N/D	#N/D
1,60	#N/D	#N/D	#N/D
1,80	#N/D	#N/D	#N/D
2,00	69,50	70,70	
2,40	#N/D	#N/D	#N/D
2,80	#N/D	#N/D	#N/D
3,20	#N/D	#N/D	#N/D
3,60	#N/D	#N/D	#N/D
4,00	100,00	100,00	
4,77	#N/D	#N/D	#N/D
5,53	#N/D	#N/D	#N/D
6,30	100,00	100,00	
7,15	#N/D	#N/D	#N/D
8,00	100,00	100,00	
9,0	#N/D	#N/D	#N/D
10,0	100,00	100,00	
12,5	100,00	100,00	
14,0	100,00	100,00	
16,0	100,00	100,00	
18,0	#N/D	#N/D	#N/D
20,0	100,00	100,00	
23,8	#N/D	#N/D	#N/D
27,7	#N/D	#N/D	#N/D
31,5	100,00	100,00	
35,8	#N/D	#N/D	#N/D
40,0	100,00	100,00	
47,7	#N/D	#N/D	#N/D
55,3	#N/D	#N/D	#N/D
63,0	100,00	100,00	
68,4	#N/D	#N/D	#N/D
75,0	100,00	100,00	
79,2	#N/D	#N/D	#N/D
84,6	#N/D	#N/D	#N/D
90,0	100,00	100,00	

Exploring the aesthetic possibilities of using CDW in a 3D printable material

Joana Costa¹[0000-0001-8305-7843], João Teixeira²[0000-0002-3359-5157], Bárbara Rangel^{2,5}[0000-0002-5911-94233], Luís Moreira³[0000-0002-9537-9791], Lino Maia^{2,6}[0000-0002-6371-0179], Rui Neto⁴[0000-0003-2719-5672],
Jorge Lino Alves⁴[0000-0002-9327-9092]

¹ Master in Product and Industrial Design, University of Porto, Praça Gomes Teixeira, 4099-002 Porto, Portugal

² CONSTRUCT, Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

³ INEGI, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

⁴ INEGI/Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

⁵ CEAU, Centre for Studies in Architecture and Urbanism, Faculty of Architecture (FAUP), University of Porto, Via Panorâmica Edgar Cardoso 215, 4150-564 Porto, Portugal

⁶ Faculty of Exact Sciences and Engineering, University of Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal

joanamcmcosta@gmail.com

Abstract. 3D printing (3DP) is an example of a sustainable technology solution that can replace traditional manufacturing processes having in its favor the almost non-existence of waste and its production optimized, even in the case of customized products. Mortars for 3DP are based on Portland cement (PC), a material with high CO₂ emissions, that increases its environmental footprint. Pursuing the principles of circular economy, this study looks for Construction and Demolition Waste (CDW) as a possibility to reduce not only PC content, but also the virgin raw materials, such as sand used in the printable mortar composition. In this research, recycled brick sand was studied as a possible solution. While the experimental plan was being developed, new design opportunities showed up to explore colors and textures within this technology. To discover these opportunities, a set of experiments were done to find the feasibility of each solution. Meanwhile, for each mortar defined, its printability was tested. After the definition of the best CDW's to be used, an extensive chromatic study was made. As a final test, the mortar with the best results will be validated, in a 3-axis printer, printing a small piece, demonstrative of the plastic capacity of the new material. It is intended to prove the possibility of using the material in standard panels, but mainly in customized panels.

Keywords: Circular Economy; Construction and Demolition Waste; 3D printing; Cementitious materials; Sustainability

1 Introduction

3D Printing Construction (3DPC), despite being still in development and mainly oriented to the construction industry, it already has the potential to be used in Design areas [1, 2]. There are different 3DPC techniques, two of the main ones are the Binder Jetting and Material Extrusion technologies. The first one uses a fine grain size material placed by layers and held together by a pulverized binder. The presence of layers as support material allows the materialization of more complex geometries, examples of this creative freedom are the sculptural forms already printed by this technology [3]. The second technique operates with the extrusion of deposited materials filaments, also by layers. Because there is no support material, the geometric freedom is affected, however the texture given by the layered manufacturing process can be a way to investigate new aesthetic possibilities [4,5]. To explore this capability, new materials must be developed, not only fulfilling 3DP properties, but filling sustainability and aesthetic gaps. Literature indicates that it is possible to create a new palette of materials for 3DP by adopting a more sustainable supply chain.

Construction and Demolition Waste (CDW) are materials that result from buildings demolition or waste that comes from constructing new ones that can help to this change [6]. With population growth and urbanization there has been a significant increase of CDW [7]. Inadequate management of this waste has led to huge amounts of material ending up in landfills, without any thought being given to the environmental repercussions. Brick is one of these wastes and has been study in literature. For example, M. Admson analyzes [8] the impact on concrete, with the partial replacement of natural aggregates with crushed brick. Several results could be drawn from this research: i) brick aggregates showed higher porosity and absorptivity than natural aggregates; ii) concrete with brick aggregates had an increase in its workability; and iii) brick aggregates showed a slight improvement in compressive strength.

Knowing these characteristics, we set out to explore the advantage of using recycled brick sand to fully replace natural sand in a 3D Printable Material (3DPM), allowing to achieve new aesthetic possibilities while moving to a more sustainable supply chain. To achieve a 3D printable material with aesthetical concerns in mind, tests were conducted on material color, workability, extrudability, and printability. Finally, a final piece was printed to prove the printability and the aesthetic value of the developed mortar.

2 Materials and methods

2.1 Materials

In this study, the decision was to completely replace the natural aggregates (river sand) using recycled brick sand with a maximum aggregate size of 4 mm. In addition to replacing a natural raw material, this study aims to explore the aesthetic possibilities of a recycled bricks sand for a 3D printable mortar. Those brick aggregates were obtained through smashing clay bricks waste (Fig. 1). White Portland cement CEM II/B-L 32.5R was used as a binder.



Fig. 1. Granulometric curve of recycled brick sand (left), and image of the same sand (right).

2.2 Methods

This study is divided in two stages: material development and 3DP parameters. Fig. 2 shows the entire procedure for the material development. Firstly, the material's constituents were prepared. The brick sand were achieved following these steps: i) the brick was manually crushed with an hammer and placed into a crusher with the jaws positioned 4 mm apart; ii) after all the material was passed through the crusher, it was sieved using a 4.75 mm sieve; iii) the larger fragments were crushed again, with the crusher jaws 2 mm apart; iv) after this second round, the material was sieved again using the 4.75 mm sieve, and crushed one last time with the crusher jaws positioned 0 mm apart; v) finally, all the material was sieved through a 4 mm sieve (Fig. 2a) and then a particle size analysis was performed as recommended in the NP EN 1097-6 (Fig. 1). After brick sand preparation, tests with a hand syringe (baker's tube) were carried out to understand if it is possible to extrude the material, and what is the minimum amount of cement needed for a good extrudability (Fig. 2b). Following aesthetic concerns, a chromatic pallet was made to show the color possibilities provided by the two main constituents: cement and brick sand (Fig. 2c). Finally, to prove the best composition, a piece inspired in Alvar Aalto vase (Savoy Vase), was printed using a 5-axis 3D printer (Fig. 2d).

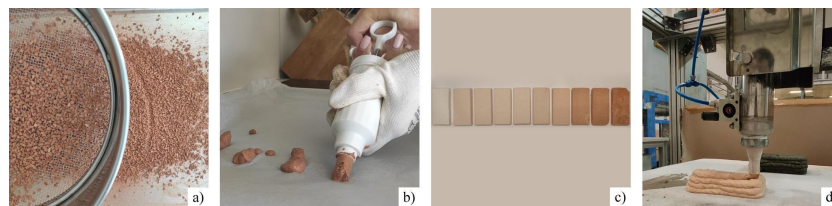


Fig. 2. Procedure performed during the material development: a) brick sand preparation (sieved at 4 mm size); b) extrudability test with a hand syringe (baker's tube); c) color palette; and d) printability test on a 3-axis printer.

This stage required a high number of steps, due to the system used not being thoroughly prepared for 3DP (3DP) with cementitious mortars. Firstly, a 3D model was obtained using the Tinkercad software, a free online 3D CAD software. The piece geometry was inspired by the Alvar Aalto vase (Savoy Vase) (Fig. 3a). Then, to transform the 3D model to a path read by the printer (G-code), a slicing software made by FDM 3D printers, Ultimaker cura, was used. Despite being a good solution for polymeric materials, when used with cementitious materials some problems arise related to the printing definition and material's properties (Fig. 3b). After obtaining the G-code file, a manual edition was made ensuring that the extruder starts and finishes the printing always in the same place, ensuring that the material is extruded under the same conditions throughout the part. To confirm that the editing of the

G-code was done correctly, the software CAMotics was used to simulate the 3DP (Fig. 3c). Finally, the printing speed and the nozzle height were established (speed: 100 mm/s; nozzle height: 15 mm in the first layer and going up to 10 mm in the following layers), and then the piece was printed (Fig. 3d).

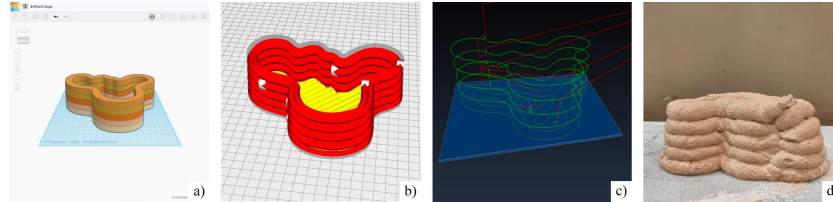


Fig. 3. Procedure performed during 3DP stage: a) Tinkercad modelling; b) slicing in Ultimaker Cura software; c) g-code edition assisted by CAMotics; and d) final printed part.

3 Results and discussion

3.1 Extrudability and color tests

The extrudability of the material was tested with a gradual reduction in the percentage of cement in the 3DPM. The goal was to reduce the cement as much as possible and understand the advantages and drawbacks in the extrudability and material color. In Table 1 is presented the constituent materials of the compositions tested and in the Fig. 4 the corresponding color obtained. The extrusion of the material is only possible in tests 4, 5 and 6. For tests 1, 2, 3 the filament, despite being extruded, was too fluid, while in tests 7 to 10), there was a clear lack of binder due to the high level of segregation. So, it can be concluded that the mixture should have at least 50% cement (mortar 6) and at least 30% of brick sand (mortar 4) to be extruded. Nonetheless it was considered that the ideal scenario for a future print would be to use 60% cement and 40% brick with a water-to-cement ratio (w/c) of 0.67 (mortar 5).

Table 1. Constituent materials of the mix compositions tested.

Test	Brick (total wt%)	Brick (solids wt%)	White Cement (total wt%)	White Cement (solids wt%)	Water (total wt%)	w/c
1	0	0	71	100	33	0.70
2	7	10	60	90	33	0.89
3	13	20	50	80	37	0.75
4	20	30	47	70	33	0.71
5	27	40	40	60	33	0.67
6	36	50	36	50	28	1.00
7	40	60	27	40	33	1.25
8	44	70	19	30	37	2.00
9	45	80	11	20	44	2.50
10	43	90	6	10	41	4.00

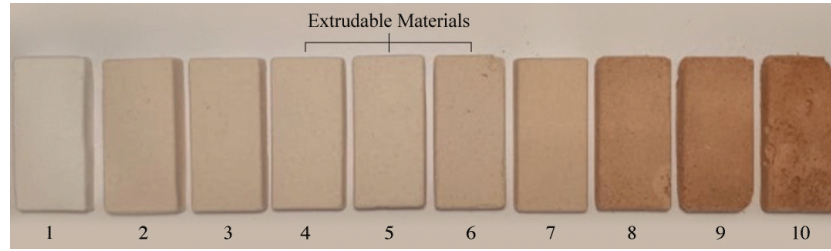


Fig. 4. Color of the mix compositions tested.

4 Printed piece

To print the final object, the composition with best results in manual extrusion tests was used as base composition. However, adjustments were made in adapting the material to the automated 3DP system (Table 2). The final composition was similar to composition 5, however due to an increase in extrusion pressure, provided by the mechanical extruder, it was possible to decrease the water content by 10%. This material optimization is suggested by Ma et al. [9].

Table 2. Final 3DPM composition used in an automated system.

Test	Brick (total wt%)	Brick (solids wt%)	White Cement (total wt%)	White Cement (solids wt%)	Water (total wt%)	w/c
Base (5)	27	40	40	60	33	0.67
Final	29	38	48	62	23	0.49

5 Final Remarks

This work intends to demonstrate the potential of residues such as CDW, for the development of a new palette of materials for 3DP. It contributes for the transition to a more sustainable supply chain, avoiding the destruction of riverbeds with the extraction of river sand. Besides, by using CDW, like brick sand, with chromatic possibilities, the aesthetical possibilities in 3DPC are increased. With the inclusion of this aggregate with white cement it was possible to achieve several colors, however, only 3 possibilities were extrudable and printable.

Despite the first results being positive and motivating, other tests to characterize the material need to be carried out, namely mechanical and durability tests.

In the future, a life cycle assessment will be carried out to assess whether the use of recycled brick aggregates is truly more sustainable than the use of natural dyes.

Acknowledgements and funding

João Teixeira would like to thank FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. for the PhD grant 2020.07482.BD through FSE/NORTE 2020 funding. This work is funded by national funds through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., under the Scientific Employment Stimulus - Institutional Call – CEECINST/00049/2018.

References

- 1.XtreeE, <https://xtreee.com/projects/>, last accessed 2022/01/18
- 2.Emerging Objects, <http://emergingobjects.com/portfolio/>, last accessed 2022/01/18
- 3.Dirk Lowke, Enrico Dini, Arnaud Perrot, Daniel Weger, Christoph Gehlen, Benjamin Dillenburger, “Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges”, volume 112, October 2018, pages 50-65.
- 4.TAM, <https://www.twente-am.com/projects/>, last accessed 2022/01/18
- 5.J. Teixeira, “Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios,” 2018.
- 6.Jorge de Brito, “A Reciclagem na Casa do Futuro - Reciclagem de resíduos da construção e demolição,” no. March 2006, 2006.
- 7.M. Yazdani, K. Kabirifar, B. E. Frimpong, M. Shariati, M. Mirzozaffari, and A. Boskabadi, “Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 280, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.12138.
- 8.M. Adamson, A. Razmjoo, and A., Poursaee, “Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 426–432, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056.
- 9.Guowei Ma, Zhijian Li and Li Wang, “Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing”, *Construction and Building Materials*, vol 162, 20 February 2018, pages 613-617

