

Mestrado em Design Industrial e de Produto
Universidade do Porto

Impressão 3D de um Produto a Partir de Resíduos de Mármore

Pedro Alexandre Pereira Pêgo

M

2023

Orientação:

Professora Doutora Bárbara Rangel

Doutora Ana Mafalda Matos

RESUMO

A impressão 3D de materiais cimentícios (3DCP) como solução tecnológica apresenta características pertinentes no desempenho de formas arquitetônicas e geométricas complexas. As argamassas utilizadas para impressão têm como componente principal o cimento, devido ao alto desempenho às suas propriedades ligantes e mecânicas. Incluem ainda agregados, areia fina, adjuvantes e água.

O uso de cimento acarreta elevadas emissões de CO₂, sendo a adição de substitutos parciais do cimento utilizada como forma de diminuição de tais emissões, contribuindo para a redução de custos da argamassa e na poupança de energia. Neste sentido, a substituição parcial do cimento Portland (CP) por resíduos industriais nomeadamente o pó de mármore é benéfica, considerando os aspetos económicos, ambientais e a valorização desse resíduo.

Assim, esta investigação, estudou a integração do pó de mármore proveniente dos resíduos de uma empresa de mobiliário local no contexto da impressão 3D de argamassas para fins de design de produto. Primeiramente, tratou-se o resíduo de mármore em laboratório, para posteriormente se efetuar a caracterização do material de modo a testar a compatibilidade com as propriedades do cimento. Em seguida, realizou-se o estudo de composições das argamassas com variadas percentagens de pó de mármore e os respetivos testes laboratoriais.

Por fim, após a *printability* da composição ser testada, procedeu-se ao desenvolvimento de uma mesa de centro, demonstrando os benefícios da impressão 3D com argamassas no contexto do design de produto.

Palavras-chave: Design, Resíduos de Pó de Mármore, Impressão 3D, Economia Circular, Valorização de Resíduos

ABSTRACT

The 3D printing of cementitious materials (3DCP) as a technological solution presents pertinent characteristics in the performance of complex architectural and geometric forms. The mortars used for such printing have cement as their main component, due to the high performance of their binding and mechanical properties. It also includes aggregates, usually fine sand, adjuvants and water.

The use of cement results in high CO₂ emissions, and the addition of partial cement substitutes is used as a way of reducing these emissions, while also helping to reduce mortar costs and save energy. In this sense, the partial replacement of Portland cement (PC) with industrial waste such as marble dust is beneficial, considering the economic and environmental aspects and the recovery of this waste, which would otherwise be disposed of in landfills.

This research therefore studied the integration of marble dust from the waste of a local furniture company in the context of 3D printing of mortars for product design purposes. Firstly, the marble waste was treated in the laboratory, dried and ground, and then the material was characterized to see if it was compatible with the properties of cement. Next, mortar compositions with varying percentages of marble dust were studied and tested in the laboratory.

Finally, after testing the printability of the composition, a coffee table was developed, demonstrating the benefits of 3D printing with mortars in the context of product design.

Keywords: Design, Waste Marble Powder, 3D Printing, Circular Economy, Waste Valorization

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Barbara Rangel, pelo processo de orientação e disponibilidade para me auxiliar ao longo desta jornada sempre com extrema simpatia e boa disposição.

À Doutora Ana Mafalda Matos pela paciência que teve comigo, pela sua sabedoria e conhecimento numa área onde eu não tinha qualquer conhecimento prévio e pela preocupação demonstrada numa altura difícil que passei.

Aos técnicos dos laboratórios de Materiais e de Estruturas do DEC que contribuíram para a realização deste projeto.

Aos meus pais e à minha irmã por todo o carinho e apoio que me deram nesta fase, pela força e motivação em tempos em que estava mais perdido e desanimado.

À Marta, pelo amor e carinho que tem por mim e pela motivação constante.

Ao Leo, o meu afilhado por me fazer rir sempre que estou com ele e pela felicidade que sinto quando estou na sua presença.

Aos meus amigos dos TWTB, que são espetaculares e atenciosos, pelos cafezinhos depois de um dia de estudo ou de trabalho.

ÍNDICE

RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Contexto.....	3
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Metodologia	7
1.5 Estrutura da Dissertação	8
2 ESTADO DA ARTE	10
2.1 Design e Economia Circular	12
2.1.1 O que é, e porque precisamos de uma transição de Economia	12
2.1.2 Princípios da Economia Circular	14
2.1.3 Design Circular.....	18
2.2 Resíduos de Mármore	24

2.2.1	Poluição Gerada pelos Resíduos de Mármore	27
2.3	Impressão 3D	31
2.3.1	Impressão 3D	31
2.3.2	Impressão 3D com Materiais Cimentícios	33
2.3.3	Requisitos de desempenho da argamassa	36
3	ESTUDO DE COMPOSIÇÕES PARA IMPRESSÃO 3D	38
3.1	Considerações Gerais	39
3.2	Materiais Constituintes	41
3.2.1	Pó de Mármore: Origem do resíduo e tratamento em Laboratório 41	
3.2.2	Cimento	49
3.2.3	Agregado	52
3.2.4	Superplastificante	53
3.3	Produção das argamassas	54
3.4	Ensaio de Espalhamento	56
3.5	Teste de Extrusão Manual	57
3.6	Determinação das Resistências Mecânicas	58
3.6.1	Ensaio à Flexão	59
3.6.2	Ensaio à Compressão	61
3.7	Análise dos Resultados	63
4	DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	66
4.1	Definição do Conceito	68
4.2	Criação de Modelos Tridimensionais	71
4.3	Renderização	74

4.4	Impressão 3D do Produto	75
4.4.1	Impressão Teste - Vaso	75
4.4.2	Impressão Final - Mesa de Centro.....	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1	Conclusões	84
5.2	Limitações e Desenvolvimentos Futuros	86
	BIBLIOGRAFIA	88
	ANEXOS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Extração e corte de calcário para rocha ornamental no Alentejo (Portugal).	4
Figura 2 – Acumulação de lama de mármore junto das pedreiras no Alentejo (Portugal).	4
Figura 3 – Imagem ilustrativa do Diagrama Borboleta. Retirada de Ellen Macarthur Foundation (2019). (https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials)	16
Figura 4 – Gráfico dos modelos de negócio em relação ao valor do conteúdo referente ao produto e ao serviço	23
Figura 5 – Produção de resíduos por actividades económicas na UE em 2020 (<i>Statistics Explained - Waste Statistics</i> , 2020)	26
Figura 6 – Resíduos de mármore depositados no local de extração (Kore & Vyas, 2016).....	28
Figura 7 – Resíduos de Mármore despejados em terrenos não autorizados perto de uma linha férrea (Central Pollution Control Board Zonal Office (Central) Bhopal, 2012)	28
Figura 8 – Processo Comum de Fabricação Aditiva (Kawalkar et al., 2021)	33
Figura 9 – "House 1" da empresa 3DCP Group (<i>3DCP Group - The Technology</i> , 2023)	34
Figura 10 – Casa impressa em Tabasco, Mexico feita pela empresa ICON 3D (<i>3D-Printed Homes in Nacajuca, Mexico with New Story – ICON</i> , 2023)	34
Figura 11 – Propriedades frescas e reológicas de argamassas binárias à base de pó de mármore (Dada et al., 2021).	36
Figura 12 – Corte e polimento do Mármore respetivamente.	42

Figura 13 – Pó do mármore misturado com a água.	42
Figura 14 – Pó de Mármore a passar pelos canais de saneamento.	43
Figura 15 – Tanque 1 e 2 respetivamente.	43
Figura 16 – 3º Tanque a despejar o pó de mármore filtrado e BigBag cheio a secar, respetivamente.	44
Figura 17 – Resíduos de Mármore: Rosa, Cinzento-Claro e Cinzento-Escuro por esta ordem.	44
Figura 18 – Resíduo de Mármore em estufa a 100 ± 2 Cº até obter massa constante	45
Figura 19 – a) Resíduo de Mármore após secagem; b) desagregação com pilão do Resíduo de Mármore seco.	46
Figura 20 – Mistura dos 3 tipos de Resíduos de Mármore	46
Figura 21 – Moagem na máquina de Los Angeles durante 30 minutos.....	47
Figura 22 – Resultado do processo de moagem no Los Angeles – Pó de mármore.....	47
Figura 23 – Curva Granulométrica do GMP	48
Figura 24 – Curva Granulométrica do Cimento Branco Portland CEM II /B-L 32.5 R	51
Figura 25 – Curva Granulométrica da Areia	52
Figura 26 – Pesagem dos materiais constituintes da argamassa: a) Cimento Branco Portland CEM II 32.5 R B-L; b) Areia; c) GMP; d) Água; e) Sika® ViscoCrete®-5501	55
Figura 27 – Processo de Amassadura no Mortar Mixer.....	55
Figura 28 – Esquema do processo de amassadura.....	55
Figura 29 – Visualização do processo de ensaio de espalhamento, a) compósito na mesa; b) compósito tamponado 25 vezes; c) molde retirado para tamponar 25 vezes em 15 segundos a uma altura de 12,5mm; d) Esperar que o compósito pare; e) medição dos diâmetros perpendiculares	56

Figura 30 – Testes de extrusão manual das argamassas GMP0%, GMP5%, GMP10%, GMP20% e GMP50%.....	57
Figura 31 – Provetes prismáticos com dimensão 40mm x 40mm x 160mm para ensaio de resistências mecânica.	58
Figura 32 – Ensaio à flexão de um provete GMP.	59
Figura 33 – Média dos resultados obtidos no ensaio à flexão do GMP.....	60
Figura 34 – Ensaio à compressão de um provete de GMP.....	61
Figura 35 – Média dos resultados obtidos no ensaio à compressão.....	62
Figura 36 – a) “ <i>Campus Facing East</i> ”,(Virtual Tours of SC Johnson’s Global Headquarters, n.d.) e b)“ <i>Workroom in Administration Building</i> ”, (SC Johnson’s Frank Lloyd Wright Buildings: You’re Always Welcome for Tours, n.d.)	68
Figura 37 – a) Paimio Chair de Alvar Aalto, imagem de Artek (Souza, 2021); b) Tea Trolley de Alvar Aalto, (<i>Tea Trolley, Designed by Alvar Aalto for Artek — Modernity</i> , n.d.).....	69
Figura 38 – Interior da Organic House de Javier Senosiain (<i>Organic House / Javier Senosiain ArchDaily</i> , n.d.).....	69
Figura 39 – Esquícios de silhuetas de mesas de centro	70
Figura 40 – Modelação para a criação do contorno estrutural, dimensionamento e controlo volumétrico utilizando o software Solidworks. a) Modelação peça 1: vol. 32,77L; b) Modelação peça 2: 31,05L; c) Modelação peça 3: vol. 29,51L; d) Modelação peça 4: vol. 28.38L; e) Modelação peça 5: vol. 31,23L; f) Modelação peça 6: vol. 25,8L.....	72
Figura 41 – Desenho técnico da modelação final	73
Figura 42 – Renderizações da mesa de centro.....	74
Figura 43 – Numeração dos componentes da impressora “Bemore 3D – SMART”.	76
Figura 44 – Impressora 3D “Bemore 3D – SMART”	76
Figura 45 – Modelação 3D do vaso no SolidWorks.....	77

Figura 46 – Transformação da modelação 3D do vaso para no PrusaSlicer.	77
Figura 47 – Renderização do vaso.....	77
Figura 48 – Impressão do vaso.....	77
Figura 49 –Vaso impresso.	77
Figura 50 – Vaso seco.	77
Figura 51 – Modelação 3D final da mesa de centro no SolidWorks.	79
Figura 52 – Transformação da modelação 3D da mesa de centro para código G no PrusaSlicer.	79
Figura 53 – Renderização do código G da mesa de centro.	79
Figura 54 – Impressão da mesa de centro.	80
Figura 55 – Mesa de centro impressa.	80
Figura 56 – Mesa de centro seca.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de elementos maiores do Pó de Mármore.....	48
Tabela 2 – Análise Química, Física e Mineralógica do CEM II/B-L.....	50
Tabela 3 – Características Mecânicas do CEM II/B-L	51
Tabela 4 – Dados do Produto Sika® ViscoCrete®-5501	53
Tabela 5 – Composições estudadas para um volume de 1.2L.....	54
Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio à flexão.....	97
Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio à compressão	98

LISTA DE ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FBAUP – Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto

3DP – *3D Printing*

3DCP – *3D Concrete Printing*

GMP – *Granulated Marble Powder*

EC – Economia Circular

UE – União Europeia

AM – Manufatura Aditiva

AMoC – *Additive Manufacturing of Concrete* (Fabrico Aditivo de Betão)

CP – Cimento Portland

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

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

Este capítulo apresenta o trabalho desenvolvido no decorrer da dissertação, intitulada “Impressão 3D de um Produto com Utilização de Pó de Mármore como Material Constituinte duma Argamassa de Imprimível em 3D”. O estudo deste tema centra-se na possibilidade de usar o pó de mármore como material constituinte de uma argamassa de impressão 3D para o desenvolvimento de um produto.

1.2 Motivação

Os resíduos industriais são uma consequência do processo de fabricação de produtos ou de processos industriais, e, apesar de existirem tratamentos passíveis de serem realizados antes do seu descarte, estes nem sempre são aplicados.

A indústria da rocha ornamental está entre as mais poluentes do mundo (*Statistics Explained - Waste Statistics, 2020*), maioritariamente devido aos resíduos descartados em aterros ou em lugares que não têm como finalidade o depósito dos mesmos, nomeadamente junto das pedreiras (ver Figuras 1 e 2).



Figura 1 – Extração e corte de calcário para rocha ornamental no Alentejo (Portugal).



Figura 2 – Acumulação de lama de mármore junto das pedreiras no Alentejo (Portugal).

O calcário tem uma importância considerável em Portugal e corresponde a mais de 30% da extração total de rochas ornamentais, com mais de 1 100 000 toneladas extraídas em 2020 (*Quarry Annual Production, n.d.*). Os sectores de extração e transformação do mármore têm vindo a aumentar gradualmente, incluindo em Portugal (*Quarry Annual Production, n.d.*), devido à crescente procura e consequente aumento da produção. Como tal, a quantidade de

resíduos de extração e transformação do mármore, um dos problemas mais significativos deste sector, também está a aumentar (*Demirel & Alyamaç, 2018*). Durante o corte e/ou polimento do mármore, ambos processos húmidos, o pó de mármore e a água misturam-se dando origem a uma lama. Estes tipos de resíduos industriais sólidos necessitam de tratamento adequado para não poluírem o ambiente e podem ter valor acrescentado. Estima-se que a lama de mármore gerada no processo de extração e corte seja de 20% a 50% da massa da pedra extraída (*Demirel & Alyamaç, 2018; Marras et al., 2010*).

De acordo com a Diretiva Europeia 2003/33/CE, as lamas de mármore são classificadas como resíduos inertes, uma vez que são constituídas principalmente por partículas minerais (calcite, dolomite, vestígios de de quartzo, micas, feldspatos e minerais de argila) com quantidades mínimas de floclantes e resíduos de resina. Quando a lama de mármore é seca e desagregada transforma-se num pó fino; e, em média, 90% das partículas têm menos de 200 μm (*Aruntaş et al., 2010*). Este pó fino tem características semelhantes aos *fillers* utilizados por outros sectores industriais, como o sector da construção. Assim, a reutilização dos resíduos de lamas de mármore como substituto parcial do cimento Portland (CP) pode constituir uma oportunidade de ganhos técnicos, ambientais e económicos.

Assim sendo, esta dissertação procura encontrar soluções para reaproveitar os desperdícios da indústria do mármore, nomeadamente o pó do mármore em materiais cimentícios.

1 – “*fillers*” são materiais adicionados ao betão que podem melhorar propriedades específicas, tornar o produto mais barato ou uma mistura de ambos.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar a possibilidade de desenvolver um produto utilizando pó de mármore como material constituinte. O pó de mármore será utilizado como materiais constituintes numa argamassa de base cimentícia que será utilizada para desenvolver um produto de design.

O produto será produzido por tecnologias de Fabrico Aditivo, nomeadamente a impressão 3D. Nesta tecnologia o depósito de matéria-prima é feito verticalmente e em camadas, culminando na impressão de uma peça. O fabrico aditivo tem vantagens face ao fabrico subtrativo, nomeadamente no que se refere aos resíduos gerados.

Assim, o cumprimento do objetivo geral desta tese, divide-se nos seguintes objetivos específicos:

- Estudar argamassas para impressão 3D utilizando pó de mármore com substituição parcial de CP;
- Selecionar a argamassa que reúne a melhor combinação de cimento + pó de mármore tendo em conta requisitos técnicos e ambientais;
- Design de um produto passível de ser impresso em tecnologia 3DPC; utilizando a argamassa desenvolvida.
- Dar valor acrescentado a um resíduo industrial local e abundante;
- Promover a confiança na utilização de resíduos como materiais primários em argamassas cimentícias.

1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos para esta dissertação, foi adotada a seguinte metodologia:

- i. Pesquisa bibliográfica incidindo nos problemas originados pelos resíduos de mármore e o subsequente pó, os conceitos da economia circular que se enquadram nos modelos de desenvolvimento sustentável e a impressão 3D como tecnologia de fabricação aditiva capaz de reutilizar de forma proveitosa o pó de mármore em argamassas cimentícias de impressão;
- ii. Visita a uma indústria de transformação de mármore no Grande Porto;
- iii. Recolha de amostras representativas e aleatórias de lamas de resíduos de mármore dessa indústria;
- iv. Tratamento de lamas de mármore em laboratório;
- v. Caracterização fundamental do pó de mármore gerado no passo anterior (química e física);
- vi. Estudo de composições ao nível da argamassa e verificação da trabalhabilidade;
- vii. Caracterização mecânica das argamassas;
- viii. Seleção ótima de argamassas para *scale-up* (Impressão 3D);
- ix. Design, modelação 3D e impressão de um produto.

1.5 Estrutura da Dissertação

Este documento está subdividido em 5 capítulos, nomeadamente:

No primeiro capítulo, Introdução, é apresentado o tema estudado, bem como os seus objetivos e a organização da dissertação.

No segundo capítulo, Estado da Arte, é apresentada revisão bibliográfica, nomeadamente incidindo nos seguintes tópicos, i) problemática da Indústria do Mármore e dos resíduos gerados pela mesma; ii) o design e a economia circular como orientação teórica que fundamenta a importância da reciclagem dos desperdícios e por fim, iii) a impressão 3D como tecnologia que possibilita o reaproveitamento de materiais para integrar em argamassas cimentícias.

No capítulo 3, Estudo de Composições para Impressão 3D, apresenta-se o desenvolvimento das várias argamassas com diferentes percentagens de pó de mármore como substituto do cimento na composição.

O capítulo 4, Desenvolvimento do Produto, apresenta o processo de design do produto, contando com as fases de pesquisa, desenvolvimento, modelação e renderização de várias opções dentro do conceito definido. Posteriormente, foi realizada a impressão 3D do produto final com a composição escolhida dentro das elaboradas no capítulo 3.

No capítulo 5, Conclusões e Desenvolvimentos Futuros, são apresentadas as conclusões, assim como os desenvolvimentos futuros que poderão advir do estudo deste tema.

2 ESTADO DA ARTE

No estado da arte foi desenvolvida uma análise ao design como um veículo para uma economia circular na indústria do mármore- reciclando os seus resíduos através da utilização do pó de mármore em argamassas de impressão.

Enquadrou-se o tema de estudo, efetuando uma abordagem aos resíduos de mármore, impacto ambiental para com o planeta e ao pó produzido ao longo da trajetória da matéria-prima. Tendo em consideração a problemática, foi realizada uma análise dos princípios e estratégias da economia circular, bem como a prática do design pode originar novas soluções ao aplicar estes conceitos. Por fim, aborda-se a 3DCP (impressão 3D de betão) como tecnologia que permite reciclar o pó de mármore como substituto parcial de cimento num produto.

2.1 Design e Economia Circular

2.1.1 O que é, e porque precisamos de uma transição de Economia

A Economia Linear é um sistema económico de gestão linear de recursos, tendo como base o conceito de extrair, produzir e descartar. O nome “Economia Linear” provém do trajeto de vida dos seus recursos, materiais e produtos, que é em uma única direção, da matéria-prima (origem) até ao seu descarte (desperdício). Para além de não usufruírem de todo o potencial dos materiais, ainda poluem e degradam os sistemas naturais como por exemplo as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade e ecossistemas.

A estrutura desta Economia foi estabelecida na Revolução Industrial, que dada a altura foi uma mais valia visto que os países que se industrializaram tornaram-se sociedades mais prosperas, o que levou ao aumento da população mundial e a milhões de pessoas saírem da pobreza. Apesar deste desenvolvimento global, é de notar que este só foi possível devido à extração de recursos limitados do planeta e da degradação da natureza característica deste modelo económico que ainda não mudou. Esta é uma abordagem insustentável do ponto de vista ambiental do qual esta economia opera, pois funciona de forma destrutiva no nosso ambiente, impulsionando a perda de materiais valioso, má gestão de recursos e de uso da terra nos setores da agricultura, construção e transporte (*What Is the Linear Economy? 2018*).

O Planeta Terra não pode sustentar as atuais formas de desenvolvimento humano (*van Dam et al., 2020*). Deste modo, torna-se necessário explorar novos sistemas económicos que tenham em conta o seu impacto ambiental, dentro dos quais se destaca a EC.

A concepção do que é a Economia Circular é relativamente recente, começou a ser pensado por Boulding (1966), Pearce e Turner (1989), Stahel e Reday-Mulvey (1981) e Frosch e Gallopoulos (1989) na necessidade de mudar o que era o modelo tradicional linear da indústria num sistema em que os resíduos integrassem um papel significativo na indústria gerando mais valor, ao invés de saírem do sistema (Mestre & Cooper, 2017).

As organizações governamentais e todo o comitê empresarial têm exposto a pressão que se está a pôr em cima dos recursos globais e do clima por consequência da atividade do ser humano (Bocken et al., 2016). Devido a estes fatores, na última década o conceito de Economia Circular e Sustentabilidade têm recebido uma maior atenção com a finalidade de proporcionar uma melhor alternativa para o desenvolvimento económico combatendo o conceito de extrair, produzir e descartar (Ghisellini et al., 2016).

Uma Economia Circular é um sistema económico que visa restaurar, regenerar e *«manter os produtos, componentes e materiais sempre ao seu mais alto valor e utilidade, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos.»* (Ellen Macarthur Foundation, 2015)."

É um modelo económico que separa o consumo desenfreado de recursos finitos para o bem do crescimento económico, conjugando o seu crescimento e os benefícios ambientais, aumentando a eficiência das atividades industriais (van Dam et al., 2020).

«O objetivo da próxima revolução industrial é garantir que não haverá resíduos, com base no facto de que os resíduos são simplesmente alguma substância que ainda não temos a inteligência para utilizar... Na próxima revolução industrial tem de haver um ciclo de volta do utilizador à fábrica, que a indústria tem de fechar.» (Spilhaus, 1970: 1673) como citado em (Ekins et al., 2019)."

2.1.2 Princípios da Economia Circular

Nós, seres humanos, em vez de adotarmos uma Economia Linear (extrair-produzir-desperdiçar), poderíamos aplicar estes conceitos de sistemas naturais na economia (Peck, 2018).

Deste modo, a Economia Circular, firma-se nos seguintes princípios, como: i) eliminar resíduos e poluição; ii) desperdícios é igual a alimentos; iii) circular produtos e materiais; iv) construir a resiliência através da diversidade; v) utilizar energia proveniente de recursos renováveis; vi) pense em sistemas e regenerar a natureza.

O primeiro princípio é Eliminar Resíduos e Poluição, apoia-se na ideia que os resíduos e a poluição derivam de um mau planeamento de design, ou seja, na altura do seu desenvolvimento não se teve em consideração o final de vida desse produto pois eles foram desenhados para serem descartados. Desta forma conclui-se que o desperdício é uma escolha de design criado pelo ser humano, porque na natureza nada é desperdiçado *«O problema começa com o design – a solução também»* (Ellen Macarthur Foundation, 2019). O que se deve retirar deste princípio é que o desperdício só acontece porque há um mau desenvolvimento do design dos produtos e materiais, pois nem todas as fases de vida do produto são pensadas, se fossem, estes desperdícios teriam sido recuperados de modo a entrar de novo na economia.

O segundo princípio é Desperdícios é a Igual a Alimentos. É um princípio inspirado na natureza considerando o ciclo continuo dos materiais, *«As aves comem bagas. Os excrementos das aves contêm sementes de bagas. Os excrementos das aves também atuam como fertilizante para as sementes, permitindo que estas cresçam em plantas. Os 'desperdícios' das aves são 'alimentos' para as bagas das plantas»* (Peck, 2018). Com isto, (Peck, 2018)

menciona que o fim do ciclo de vida de um material ou de um produto não devia ser em resíduo, mas sim, na origem de um novo círculo de utilização.

O terceiro princípio é Circular Produtos e Materiais. É uma continuação do segundo princípio, pois continua o raciocínio de circular os materiais e os produtos baseando-se nos sistemas naturais, mas definindo duas maneiras em como os materiais podem ser mantidos em circulação, o técnico e o biológico. Segundo (Ellen Macarthur Foundation, n.d.-a), num ciclo técnico, «...os produtos são reutilizados, reparados, remanufaturados e reciclados...» onde se começa por manter os produtos inteiros retendo o maior valor possível, começando pela sua reutilização, ou reparação. Por fim, quando já não for possível fazer um dos dois R's, passa-se para a remanufatura ou a reciclagem, sendo a reciclagem o último recurso visto que «...o valor incorporado aos produtos e componentes é perdido». No ciclo biológico, (Ellen Macarthur Foundation, 2019) refere-se à utilização de recursos biológicos renováveis de uma forma que regenera os sistemas naturais, em vez de os degradar. Isto inclui atividades como a agricultura sustentável, a agricultura biológica, e a utilização de matérias-primas renováveis para produtos de base biológica.

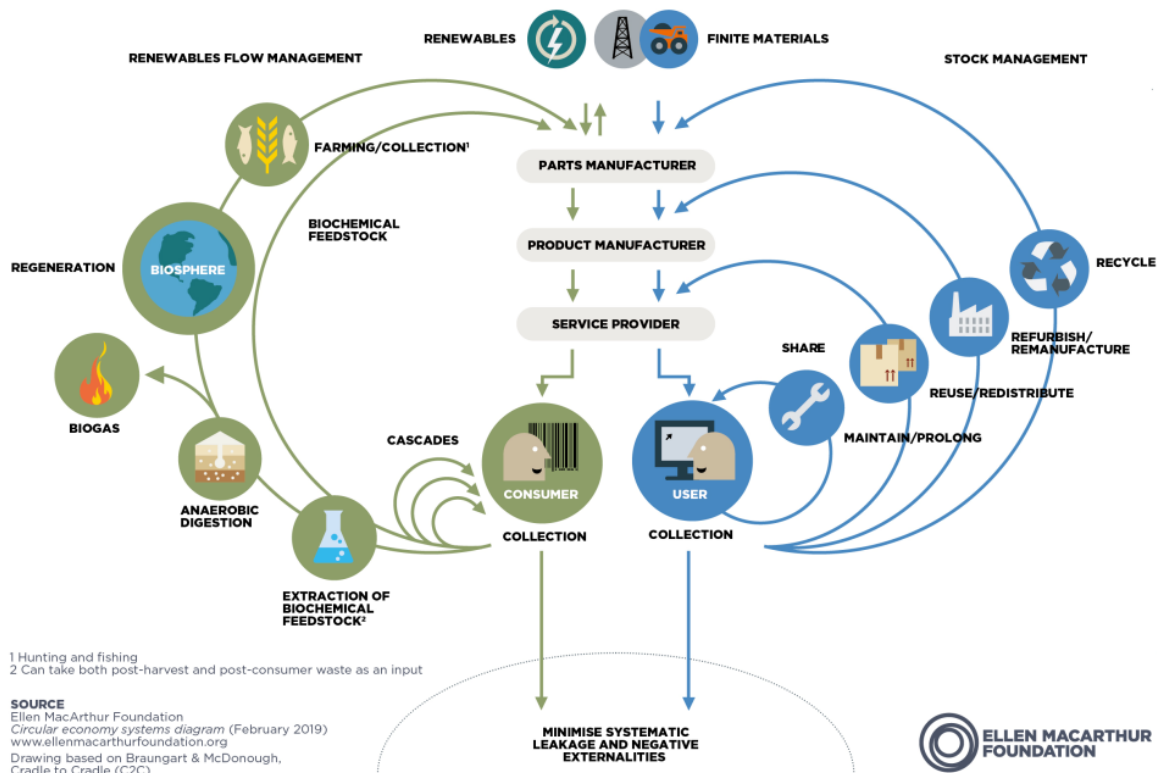


Figura 3 – Imagem ilustrativa do Diagrama Borboleta. Retirada de Ellen Macarthur Foundation (2019). (<https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials>)

No quarto princípio, Construir a Resiliência Através da Diversidade, refere-se à diversidade de sistemas na natureza, tornando-a mais forte e resiliente pois como tens mais componentes e camadas consegue lidar com a mudança e a perturbação (Peck, 2018).

«Os sistemas diversificados, com muitas ligações e escalas, são mais resilientes face a choques externos do que os sistemas construídos apenas para maximizar a eficiência e o rendimento, que, levados ao extremo, resultam em fragilidade» (Ellen Macarthur Foundation, 2013).

O quinto princípio é Utilizar Energia Proveniente de Recursos Renováveis, e parte do princípio de que qualquer económica que vise a circularidade deve começar por analisar de onde é extraída a energia para a prática da

produção.(Ellen Macarthur Foundation, 2013) A energia utilizada deve ser renovável, como por exemplo a energia solar, eólica, hídrica, oceânica, geotérmica e biomassa pois são energias que são fornecidas diariamente sem terem de ser extraídas.

O sexto princípio é “Pensar em Sistemas”, defende que as conceções entre indústria, pessoas, sociedade e ambiente apesar de serem sistemas distintos agem mutuamente dando origem à criação de novos ganhos económicos, sociais e ambientais (Ellen Macarthur Foundation, 2013). Inspirando-se na natureza onde como por exemplo a cadeia alimentar, onde se uma espécie se extingue, outras espécies podem ser afetadas por isso, pois, todas necessitam umas das outras (Peck, 2018).

Por fim, o sétimo princípio é “Regenerar a Natureza”, parte do princípio de que ao mudar de economia linear para uma circular também é preciso começar a regenerar a natureza ao invés de só extrair dela, passando a simular os sistemas naturais, como foi escrito no segundo princípio, nada na natureza é desperdício há sempre uma nova função a se tomar (Ellen Macarthur Foundation, 2019), como foi transcrito no segundo princípio, «... *'desperdícios' das aves são 'alimentos' para as bagas das plantas.*» (Peck, 2018). Se os produtos e materiais forem mantidos em uso, não será preciso extrair com tanta regularidade pois não será a obtenção de novas matérias-primas, deste modo a natureza poderá regenerar.

2.1.3 Design Circular

O Design Circular é uma abordagem ao Design, onde o processo de criação dos produtos é desenvolvido para uma Economia Circular, desde a sua idealização até ao seu fim de vida. A poluição e os resíduos gerados são uma reação às más decisões de design, desta forma, como o design tem o poder de criar resíduos e poluição, também tem o poder de arranjar estratégias para a prevenção destes acontecimentos desde o início.

O design é um ponto fulcral para uma Economia Circular, não no sentido estético, mas sim num processo criativo, racional e iterativo para criar soluções para problemas. Desta forma, (Sumter et al., 2021) apresentou 9 competências para o design: 1) Pensamento em sistemas circulares, 2) Design para recuperação, 3) Design para múltiplos ciclos de utilização, 4) Propostas de negócio circulares, 5) Envolvimento circular do utilizador, 6) Materiais e fabrico circular, 7) Avaliação circular do impacto, 8) Colaboração do domínio da economia circular, 9) Storytelling sobre economia circular. Estas competências refletem as habilidades que os designers têm de ter para desenvolver design para uma Economia Circular.

- Pensamento em Sistemas Circulares – a economia circular é um sistema complexo, desta forma o processo de design deve ser abordado, também, de forma sistémica
- Design para a Recuperação – refere-se às estratégias de desaceleração e encerramento dos ciclos (*Slow Resource Loops* e *Close Resource Loops*) para a recuperação dos produtos, componentes e materiais.
- Design para Múltiplos Ciclos de Utilização – a meta desta estratégia é projetar o produto ou serviço com a finalidade de ter mais do que um ciclo de uso.

- Propostas de Negócios Circulares – refere-se ao desenvolvimento de propostas de negócios circulares com o objetivo de fechar o ciclo dos recursos, materiais e produtos.
- Envolvimento Circular do Utilizador – envolver os utilizadores na economia circular fazendo com que se importem com os produtos de modo a aplicá-los num novo ciclo.
- Materiais e Fabrico Circular – selecionar os melhores componentes e materiais consoante o uso considerando o seu ciclo de vida e a sua recuperação, de modo a minimizar o impacto ambiente.
- Avaliação do Impacto Circular – o impacto do design circular ao longo de toda a vida útil de um produto/serviço em termos ambientais, económicos e sociais.
- Colaboração na Economia Circular – representa o lado interpessoal do processo de design.
- Storytelling sobre Economia Circular – Criar narrativas sobre a economia circular cativando os utilizadores e outros *Stakeholders* a pensarem sobre os seus vários tópicos.

De modo a tornar a vida útil dos produtos de consumo mais duradouros e os materiais mais bem utilizados *Conny Bakker e Marcel den Hollander (2013)* definiram seis estratégias de design que combatessem a obsolescência precoce dos produtos, visto que, «...a maior parte destes produtos ainda está a funcionar quando são deitados fora.» (Bakker & Hollander, 2013).

As estratégias de design são: 1) Design para o apego e confiança; 2) Design para a durabilidade; 3) Design para a standardização e compatibilidade; 4) Design para a facilidade de manutenção e reparação; 5) Design para a possibilidade de atualização e adaptabilidade e 6) Design para a desmontagem e remontagem (Bakker & Hollander, 2013).

Estas estratégias acima referidas enquadram-se nas estratégias de design para a desaceleração do ciclo dos recursos (*Slow Resource Loop*). A desaceleração do Ciclo separa-se em dois segmentos: 1) Design de produtos para longa duração e 2) Design para prolongar a vida útil do produto, através desta estratégia «...o período de utilização dos produtos é prolongado e/ou intensificado, resultando num abrandamento do fluxo de recursos.» (Bocken et al., 2016).

2.1.3.1 Design para a Desaceleração do Ciclo dos Recursos

Design de produtos de longa duração:

- Design para o apego e confiança – o objetivo é criar produtos duráveis que originem um vínculo emocional forte com o consumidor, de modo que o mesmo os use durante mais tempo.
- Design para a durabilidade do produto – o objetivo é desenvolver produtos resistentes capazes de suportar o seu uso.

Design para prolongar a vida útil do produto:

- Design para normalização e compatibilidade – visa a modularidade do produto de modo que a mesma peça se consiga adaptar igualmente a outros produtos.
- Design para facilitar a manutenção e a reparação – o objetivo é a criação de produtos que sejam de fácil manutenção e reparação para que seja possível manter em perfeitas condições.
- Design para a atualização e adaptabilidade – desenvolver a pensar na possibilidade de futuras atualizações e modificações de um determinado produto.
- Design para desmontagem e remontagem – visa desenvolver produtos que permitam a fácil desmontagem e montagem do mesmo

O design para fechar ciclos de recursos, também denominado de “*Closed the Loop Design*” ou “*Cradle to Cradle Design*” (McDonough & Braungart, 2002), é uma abordagem de design que tem como conceito principal a criação de produtos, processos e sistemas numa economia circular, eliminando resíduos e poluição através da continua utilização dos materiais e recursos em vez de serem descartados após a sua utilização. (Bocken et al., 2016)

Segundo *Robert U. Ayres (1994)*, há apenas dois destinos para os resíduos, a reciclagem e o reuso ou a perda dissipativa, pois, para uma economia industrial sustentável, era necessário que todos os resíduos/materiais originados das indústrias fossem reciclados de modo a não constituir um problema ambiental (Ayres, 1994).

Para o fecho do ciclo dos recursos, foram elaborados dois tipos de estratégias de design para fechar o ciclo dos recursos, Design para um Ciclo Tecnológico, Design para um Ciclo Biológico (McDonough & Braungart, 2002).

Design para Fechar o Ciclo dos Recursos

- Design para um ciclo tecnológico – apropriado para os produtos que prestam um serviço, neste caso, o design do produto para um ciclo tecnológico visa a que os materiais possam ser reciclados em novos materiais ou produtos. Ao serem reciclados os materiais são designados como uma reciclagem de “*upcycling*” (resíduos de materiais em novos produtos de maior valor ou qualidade do que os originais) ou “*downcycling*” (material é reprocessado num produto de baixo valor).
- Design para um ciclo biológico – apropriado para os produtos de consumo, ou seja, produtos que se desgastam durante a sua utilização ou que são consumidos, deste modo, os materiais num

ciclo biológico são biodegradáveis de modo a darem origem a um novo ciclo.

- Design para desmontagem e remontagem – também se adequa numa estratégia de design para fechar o ciclo dos recursos

Segundo a análise de (Bocken et al., 2016) , há 4 métodos de reciclagem:

- Reciclagem Primária, é o “*Upcycling*”, visa manter ou melhorar as propriedades do material.
- Reciclagem Secundária, o material é reprocessado num produto de "baixo" valor comparativamente ao primeiro ciclo.
- Reciclagem Terciária, trata-se da recuperação dos componentes químicos de um material onde este é decomposto nos seus componentes originais e seguidamente passasse à construção do material com propriedades equivalentes ao material original.
- Reciclagem Quaternária, no espectro de uma economia circular este método não é considerado reciclagem, pois, trata-se somente da recuperação de energia dos materiais, assim sendo, encaixa-se assim num sistema linear.

Segundo *Arnold Tukker*, descreve 3 tipos de modelos de negócios circular que as empresas podem adotar para passarem de um modelo linear de vender muito e rápido para um que o objetivo seja a venda de um serviço ao invés de vender simplesmente um produto.

Os 3 modelos de negócio são: modelo de negócio orientado para o produto, modelo de negócio orientado para o uso e modelo de negócio orientado para os resultados. (Tukker, 2018)

Primeiramente, o modelo de negócio “orientado para o produto”, apesar de ainda se tratar simplesmente da venda de um produto é acrescentado também certos serviços ligados a esse produto.

O segundo modelo negócio, “orientado para o uso”, consiste no uso que um produto providencia e não no produto em si, ou seja, o consumidor paga ao fornecedor para usar certo produto pois precisa da sua função.

Por fim, modelo de negócio orientado para o resultado onde o consumidor não tem contacto com o produto, mas sim, chega a um acordo com a empresa que providencia o serviço para que um resultado seja obtido.

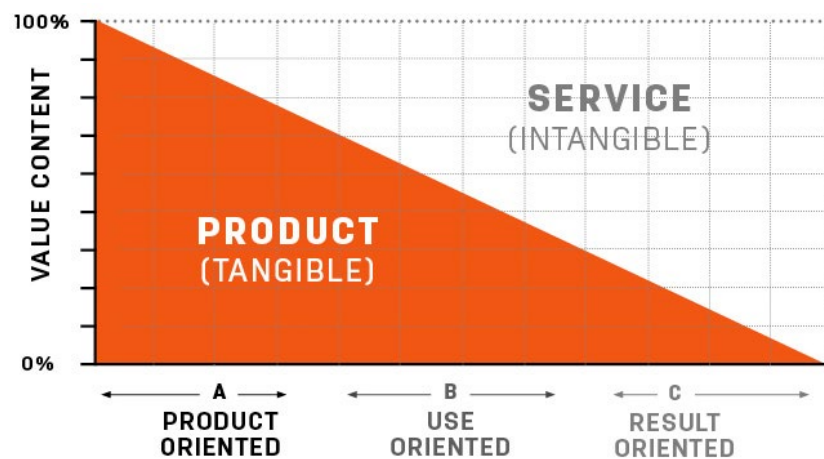


Figura 4 – Gráfico dos modelos de negócio em relação ao valor do conteúdo referente ao produto e ao serviço

2.2 Resíduos de Mármore

O mármore é dos materiais de construção mais usados há séculos. O mármore é utilizado principalmente para fins de construção e decoração devido à sua durabilidade, versatilidade e estética elegante (Singh et al., 2017).

Os seus constituintes mineralógicos são principalmente a calcite e/ou dolomite, cujas características originais foram perdidas e cujos carbonatos recristalizaram através do metamorfismo (Silva, 2016).

Os dois setores no qual o mármore se insere, setor da construção e da extração mineira e pedreiras em 2020 representaram no total cerca de 60.9% da produção total de resíduos na União Europeia. Como não é atribuído qualquer funcionalidade a estes resíduos, a maior parte acaba por ser descartado em aterros (*Statistics Explained - Waste Statistics*, 2020).

Para realizar a reciclagem do resíduo de mármore é necessário investigar que métodos são usados para que a sua reciclagem seja vantajosa tanto para o ambiente como para a indústria.

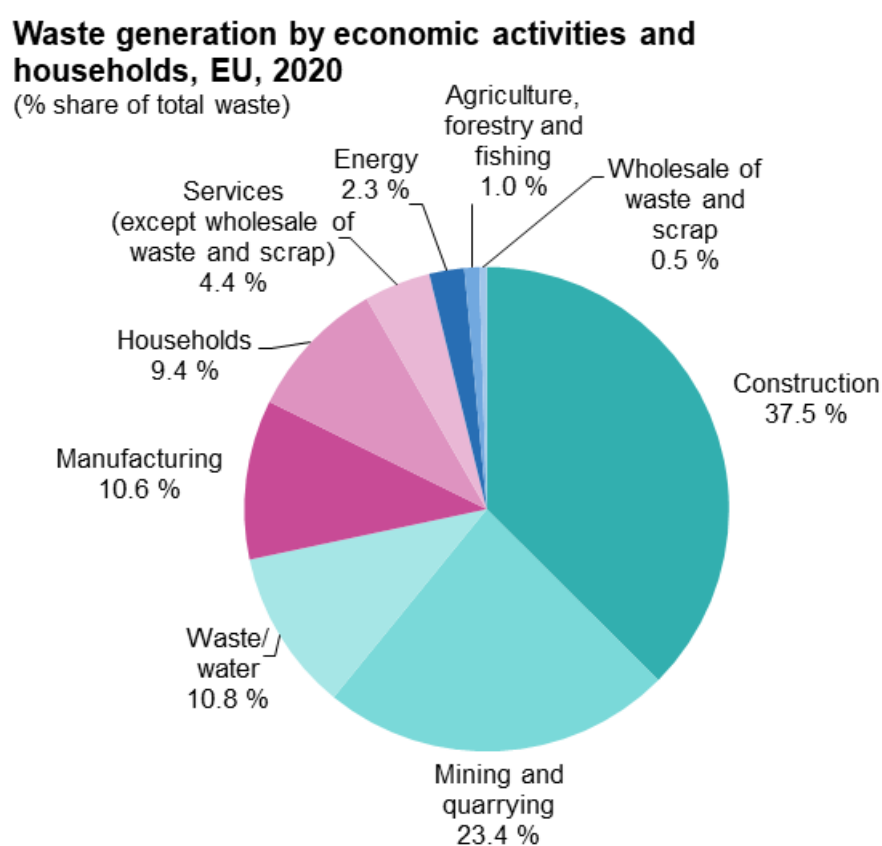
Os variados tipos de resíduos do mármore advêm da sua indústria e de todos os processos por onde a matéria-prima passa até chegar ao seu destino final nomeadamente os aterros. O setor mineiro e de extração origina dois tipos de problemas ambientais, o esgotamento dos recursos limitados através extração de toda a matéria das pedreiras e o dano gerado a todo o meio ambiente através da poluição ao redor da pedreira (Fugiel et al., 2017).

O processamento do mármore segundo a (Pulycort & David, 2019), empresa vocacionada no processamento de rocha natural incluindo o mármore consiste na extração do mármore, a chegada e descarga dos respetivos blocos de mármore, o corte de mármore, reforço e polimento, armazenamento de placas e a sua expedição.

- Extração do mármore – normalmente a extração do mármore nas pedreiras é feita através de cortes verticais dos blocos.
- Chegada e descarga dos respectivos blocos de mármore – após a sua extração, os blocos de mármore dirigem-se para a fábrica onde o seu processo de transformação vai dar início.
- Corte do mármore – corta-se os blocos grandes com um cortador multífios e seguidamente aos blocos mais pequenos é usado o cortador de blocos.
- Reforço e polimento – após estarem cortados as placas recebem um reforço de uma malha para aumentar a sua resistência, depois deste processo estar acabado, passa-se para o processo abrasivo do mármore para que seja dado o visual desejado.
- Armazenamento das placas – após o tratamento realizado as placas ficam expostas ou são diretamente embaladas para serem remessadas.
- Expedição – como o mármore é apreciado em todo mundo, comumente ele é transportado em navios, camiões e comboios

As produções de resíduos de mármore advêm do seu processamento, são classificadas em três classes de acordo com a dimensão de cada peça. As peças de maior dimensão, com alguns centímetros, são originadas dos blocos/placas que se partiram ou que estavam defeituosas, normalmente originam-se nas fases de extração, chegada e descarga do mármore, as peças de média dimensão constituídas por talas, fragmentos e lascas também são provenientes dos blocos/placas, são comumente o resultado da fase de extração e também do corte do mármore. As peças de pequena dimensão são construídas de partículas finas como pó e lama onde as fases que originam estes resíduos são o corte do mármore e o respetivo polimento e reforço do mesmo (Aidico et al., 2012).

A Figura 5 mostra a produção de resíduos por atividades económicas da qual o mármore e a rocha ornamental estão representadas em “*Construction* - 37.5%” e “*Mining and quarrying* - 23.4%”.



Source: Eurostat (online data code: env_wasgen)

eurostat 

Figura 5 – Produção de resíduos por actividades económicas na UE em 2020 (*Statistics Explained - Waste Statistics*, 2020)

2.2.1 Poluição Gerada pelos Resíduos de Mármore

As indústrias mineiras, no geral, representam um papel importante no desenvolvimento do mundo, oferecendo matérias-primas extremamente cruciais para os sectores da construção, da construção civil e da indústria manufatureira (Fugiel et al., 2017).

Apesar destes benefícios, é sabido que as indústrias extrativas contam com um impacto paisagístico e ambiental negativo (Figura 6 e Figura 7) devido aos perigos que impõe no ecossistema e aos componentes físicos, químicos e biológicos do ambiente. Segundo Bdour & Al-Juhani, (2011) os problemas consequentes deste problema são:

- Causa a diminuição da porosidade, absorção de água, percolação de água etc. da terra afetando negativamente a sua produtividade;
- Após o resíduo de mármore secar, este, transporta-se pelo ar e causa uma poluição atmosférica grave introduzindo problemas de saúde ao redor do seu local de extração ou de processamento, afetando os trabalhadores, as máquinas e os moradores mais próximos da região;
- Reduz a qualidade da água durante as estações em que ocorre maior precipitação e prejudica a vida aquática;
- Danifica as paisagens ao redor de toda a região no qual se encontra a indústria ou os aterros espalhados por todo o país, causando assim a poluição visual desses espaços;
- Perda de biodiversidade.



Figura 6 – Resíduos de mármore depositados no local de extração (Kore & Vyas, 2016)



Figura 7 – Resíduos de Mármore despejados em terrenos não autorizados perto de uma linha férrea (Central Pollution Control Board Zonal Office (Central) Bhopal, 2012)

Devido aos problemas ecológicos acima referidos, uma solução deve ser realizada para o aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria do mármore através da sua extração e transformação (Syed et al., 2018).

De modo geral o processamento do mármore origina a três grandes tipos de desperdícios: o solido, o pó e a pasta semilíquida.

Percebendo a gravidade deste problema, investigadores têm realizado pesquisas nesta matéria utilizando estes resíduos como substitutos ou aditivos em várias indústrias (Singh et al., 2017).

Ao aplicar o pó de mármore como material constituinte numa composição de argamassa não só é reduzido a quantidade de resíduos que são despejados em aterros, como também se reduz o consumo de outras matérias-primas naturais como por exemplo o cimento ou areia (Singh et al., 2017).

A utilização do pó de mármore como substituto parcial do cimento em composições de argamassas seria uma solução viável para a reciclagem do resíduo e também uma maneira de reduzir o consumo geral de cimento visto que este é um produto artificial e, a seguir à água, é o material de construção mais utilizado no mundo (Siddique et al., 2010).

Num estudo realizado por (Singh et al., 2017) sobre os impactos ambientais e económicos da utilização de resíduos de pó de mármore no betão, o

objetivo desse estudo foi avaliar o impacto ambiental da substituição de cimento e areia pelo pó de mármore usado nas composições de argamassas.

Foi identificado que a substituição ideal de cimento e/ou areia pelo pó de mármore encontra-se entre 15% e 25%.

A produção de betão consome cerca de 0,25GJ/Tonelada de energia conforme a sua análise do seu ciclo de vida, esta quantidade, comparada com a energia que a extração de matérias-primas representa (0,13 GJ/Tonelada). A produção de cimento representa um consumo de energia de 70%, o que equivale a cerca de 1,18 GJ/Tonelada (Marceau et al., 2007) *«mesmo que apenas 15% do cimento fosse substituído por resíduos de pó de mármore, o consumo de energia seria quase 1,05% inferior»* (Singh et al., 2017).

Benefícios de substituir parcialmente o cimento por pó de mármore em composições de betão:

- A utilização de resíduos de mármore em composições de argamassas de betão reduz o consumo de recursos naturais e diminui a deposição em aterros (Aukour, 2009);
- A utilização de resíduos de mármore em composições de betão causa a redução do descarte em terrenos destinados à agricultura, preservando assim o ambiente e os ecossistemas em que esse resíduo está inserido (Aukour, 2009);
- Pó de mármore inserido em composições de betão aumenta em 10% a 15% a resistência à compressão do betão (Singh et al., 2017);
- Pó de mármore inserido em composições de betão aumenta em 15% a 20% a resistência à flexão do betão (Singh et al., 2017);
- A utilização de pó de mármore na substituição de cimento em argamassas pode ser industrializada com um desempenho satisfatório (Benjeddou et al., 2020);

- É uma prática amiga do ambiente, visto que, «...a sua reutilização pode reduzir significativamente as emissões de CO₂, poupar energia, reduzir o consumo total de eletricidade e reduzir o consumo de combustível, ...» (Benjeddou et al., 2020).

2.3 Impressão 3D

2.3.1 O que é Impressão 3D?

O fabrico aditivo ou comumente chamado de impressão 3D é uma tecnologia de prototipagem rápida (RP). Este termo é usado em variadas indústrias para designar o desenvolvimento de um sistema, produto ou parte de um produto antes da sua comercialização. Atualmente o termo RP não se adequa ao potencial e às aplicações mais recentes desta tecnologia, visto que já é possível obter produtos de qualidade superior que se equiparam ao produto final, levando ao fabrico direto nessas máquinas.(Gibson et al., 2014)

O processo de fabrico aditivo baseia-se na produção de objetos criados em modelação 3D (3D CAD) ou através do seu scan. O material é adicionado, camada a camada, retirando diretamente a matéria-prima, esta em pó, líquido, folha ou filamento sem a necessidade de recorrer a moldes e ferramentas (Luiz Mattos Nascimento et al., 2019).

A tecnologia de fabrico aditivo simplifica o processo de produção das peças, realizando objetos 3D extremamente complexos diretamente de ficheiros CAD, necessitando simplesmente das medidas e dimensões das peças e do entendimento de como funciona as máquinas de AM e os materiais que são utilizados para se conseguir produzir uma peça (Gibson et al., 2014).

O processo de fabrico aditivo envolve algumas etapas desde a modelação até ao produto final, segundo (Gibson et al., 2014) , esta é a ordem dos processos de produção do fabrico aditivo:

1. Modelação em Software CAD – Modelar-se o objeto em 3 dimensões representando as suas medidas e faces da forma pretendida ou também se o objeto já existir pode-se realizar o processo de engenharia reversa usando tecnologias de scan;
2. Conversão do modelo 3D para ficheiro STL (*Standard Triangle Language*) – Após a modelação da peça, o modelo é convertido para o ficheiro em formato STL, pois é um formato de ficheiro geralmente aceite por todas as máquinas de AM;
3. Transferir para um software de fatiamento para Impressão 3D – Nesta fase a peça é ajustada no software de fatiamento, onde é possível alterar a posição e orientação pela qual a peça vai ser impressa e até mesmo a sua escala;
4. Configuração da máquina – Antes de se iniciar a construção, configura-se a máquina de acordo com os parâmetros desejados, tais como, a espessura das camadas, a velocidade de impressão, etc;
5. Construção – Visto que a construção do produto é automatizado não há grandes mudanças que se possa fazer após o início do processo, deste modo, apenas é necessário a monitorização superficial;
6. Remoção – Após a peça estar realizada é removida da máquina;
7. Tratamento (Mediante necessidade) – Se necessário, a peça pode requerer algum tratamento de modo a chegar aos parâmetros estéticos ou funcionais desejados;
8. Aplicação (Produto final) – A peça está pronta a ser usada;

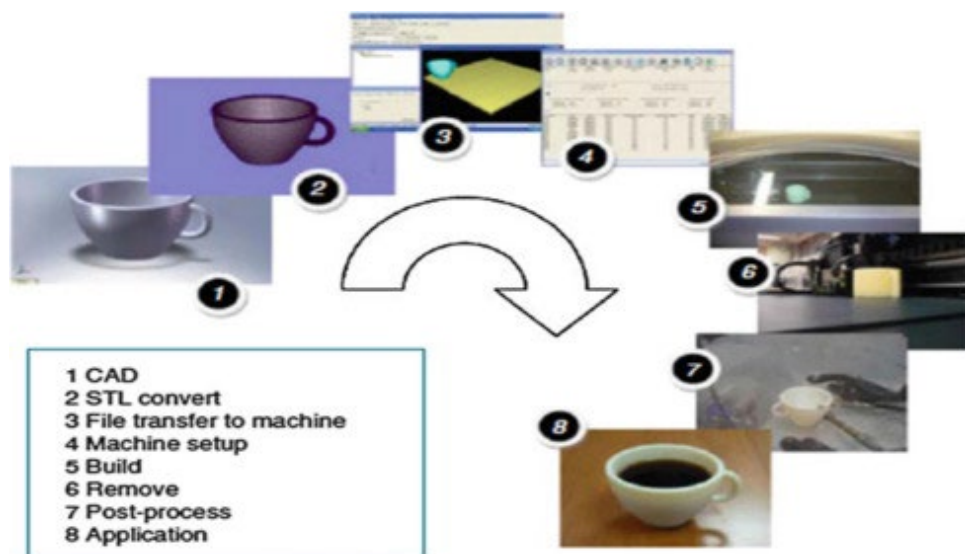


Figura 8 – Processo Comum de Fabricação Aditiva (Kawalkar et al., 2021)

A impressão 3D, devido à sua característica aditiva permite que o material seja usado na quantidade necessária ao contrário dos processos subtrativos que são conhecidos por gerarem grandes quantidades de resíduos de material. Desta forma pode-se considerar que esta tipologia de processo permite a circulação de materiais realizada num circuito fechado (Despeisse et al., 2017).

A 3DP facilita a implementação de conceitos circulares, um deles é o uso de materiais recuperados, reciclados e materiais mais sustentáveis (Despeisse et al., 2017).

2.3.2 Impressão 3D com Materiais Cimentícios

O cimento é um material de construção amplamente usado em todo o mundo, devido a sua disponibilidade no mercado e o seu preço aliado às suas características mecânicas que se aplicam a qualquer formato. Apesar das vantagens inerentes neste material, é sabido que a sua produção consome muita energia e é responsável por uma percentagem significativa de CO₂ (Bos et al., 2016).

Novos métodos de Fabricação Aditiva, como a impressão 3D têm vindo a ser desenvolvidos para a construção de betão desde meados de 1990 (Bos et al., 2016), estes métodos são designados de “AMoC” (*Additive Manufacturing of Concrete*) ou classificados como 3DCMP (*3D Cementitious Materials Printing*) (Weng et al., 2018).

A impressão 3D de betão (*3DCP – 3D Concrete Printing*) elimina a necessidade de usar moldes, pois através de linguagens de programação como no caso de Código-G permite a colocação precisa de um volume específico de camadas de betão de forma sequencial resultando num objeto produzido à semelhança do seu modelo 3D controlado pela máquina da mesma forma que a impressão 3D convencional (Buswell et al., 2018).



Figura 9 – "House 1" da empresa 3DCP Group (*3DCP Group - The Technology*, 2023)



Figura 10 – Casa impressa em Tabasco, Mexico feita pela empresa ICON 3D (*3D-Printed Homes in Nacajuca, Mexico with New Story – ICON*, 2023)

No capítulo 2, abordou-se os benefícios da utilização do pó de mármore na substituição parcial do cimento em argamassas de betão, desta forma, encontrou-se na 3DCP a solução para o fabrico de argamassas com pó de mármore, primeiramente porque a substituição parcial do cimento na impressão 3D de argamassas diminuiria o impacto ambiental e económico devido ao facto do cimento ser altamente influente nas emissões de carbono e por ser o principal constituinte neste tipo de composições (Ahmed, 2023). O uso destes materiais no betão para impressão é vantajoso devido à redução da eliminação de resíduos e aos efeitos positivos destes materiais nas propriedades de envelhecimento precoce para a capacidade de impressão (Dey et al., 2022), melhoria das propriedades mecânicas e para melhorar a fixação e o endurecimento dos materiais (Ahmed, 2023).

O plano experimental realizado por (Dada et al., 2021) com o objetivo de estudar o efeito das condições minerais e da temperatura sobre as propriedades no estado fresco (capacidade da argamassa de dificultar a saída de água por meio da evaporação ou sucção pela superfície da base) e o comportamento reológico (ciência que estuda a deformação e escoamento da matéria) do betão ecológico demonstrou que o uso de mais de 5% pó de mármore (GMP – Granulated Marble Powder) na substituição do cimento em argamassas binárias (argamassas que contêm OPC (*Ordinary Portland Cement*) e um SCM (*Supplementary Cementitious Materials* – materiais usados como substituto parcial do Cimento Portland) leva ao aumento da trabalhabilidade e da consistência da mistura. O GMP tem um poder de enchimento e um efeito de diluição, o que torna o grão de cimento mais móvel. A atividade inerte, no início da hidratação, liberta parcialmente a água da mistura, o que leva à lubrificação dos grãos e à melhoria da trabalhabilidade da mistura.

Os resultados realçam os efeitos benéficos do uso de GMP como substituto parcial do cimento, demonstrando que o uso de GMP reduz a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, aumenta o volume da pasta devido a baixa

densidade do GMP possibilitando a separação das partículas umas das outras, assim, a mistura acaba por se tornar mais fluida e com menos atrito entre as suas partículas.

Mix description	Plastic viscosity (Pa.s)	Yield stress (Pa)	Slump (cm)	Flow time (s)	V_{paste} (m ³)	Φ_{Paste}	Φ^*_{Paste}	$\Phi/\Phi^*_{\text{Paste}}$
Control OPC	7.80	24.49	10.00	2.25	0.253	0.446	0.540	0.827
10% PM	6.05	19.02	10.50	2.20	0.255	0.450	0.544	0.828
20% PM	5.11	16.05	11.00	1.50	0.256	0.454	0.548	0.828
30% PM	4.22	13.27	12.20	1.28	0.258	0.458	0.552	0.829
40% PM	6.97	21.88	09.80	2.35	0.260	0.461	0.556	0.829

Figura 11 – Propriedades frescas e reológicas de argamassas binárias à base de pó de mármore (Dada et al., 2021).

2.3.3 Requisitos de desempenho da argamassa

Com o propósito de levar em consideração os aspetos gerais de capacidade de impressão definida, é preciso ter em consideração três requisitos, a Trabalhabilidade, a Extrusabilidade e a Capacidade de Construção da argamassa à base de cimento para utilização no processo de impressão 3D por extrusão em camadas. (Harbouz et al., 2022)

Características necessárias para alcançar a Impressão 3D desejada numa argamassa:

- Trabalhabilidade – facilidade com que uma argamassa de betão pode ser manipulada e depositada através do bocal de impressão. Esta característica é definida por vários fatores, a consistência, viscosidade e fluidez da mistura ao longo de um certo período;
- Extrusabilidade – é a capacidade de uma argamassa ser extrudida de forma consistente, uniforme e fluída ao longo do processo de impressão. A má extrusabilidade pode levar ao entupimento do bocal, fluxo irregular da mistura e as interrupções no processo da impressão;
- Capacidade de Construção – refere-se à estabilidade dimensional das camadas sob o seu próprio peso e o peso das camadas sucessivas imediatamente após a extrusão, uma boa construção significa que a probabilidade de grandes estruturas impressas colapsem.

3 ESTUDO DE COMPOSIÇÕES PARA IMPRESSÃO 3D

3.1 Considerações Gerais

O capítulo 3 apresenta as atividades realizadas em Laboratório, nomeadamente, o tratamento do resíduo de mármore e sua caracterização química e física; o estudo de composições ao nível de argamassas com substituição parcial de cimento por pó de mármore (de 0% a 50% em massa), caracterização das argamassas estudados em termos de propriedades no estado fresco e endurecido. Após análise dos resultados obtidos nessas etapas, foi selecionada a composição ótima para aumento de escala, considerando requisitos técnicos e ambientais.

Primeiramente realizou-se uma caracterização dos materiais constituintes nas composições, esta caracterização serviu para descrever os aspetos técnicos dos materiais inclusive as curvas granulométricas, e também, no caso do pó de mármore, o processo de transformação de resíduo começando pela ida à MAAMI (empresa de mobiliário local que tem o mármore como matéria prima para o desenvolvimento dos seus produtos), empresa que disponibilizou o resíduo de mármore, até ao tratamento em laboratório.

A segunda fase deste processo consistiu na elaboração das argamassas, onde foram desenvolvidos 9 composições com diferentes percentagens de substituição parcial de cimento por pó de mármore (*GMP*), começando por uma argamassa de GMP0% (argamassa de referência contendo apenas cimento como ligante), GMP5%, GMP10%, GMP20% e GMP50%.

Após a realização de cada uma das argamassas o “ensaio de espalhamento” era automaticamente efetuado para que se avaliasse a consistência/ fluidez da argamassa enquanto esta ainda se encontrava no seu estado fresco. Antes que a argamassa secasse foi realizado um teste de extrusão manual com a argamassa, de modo a averiguar a capacidade de extrusão da mesma e a sua

construtibilidade. Este processo era realizado através da colocação da argamassa num saco de pasteiro e na extrusão de 3 *layers*.

As argamassas após quatorze dias foram sujeitas a testes mecânicos de modo a determinar as resistências, começando pelo ensaio à flexão e, de seguida, o ensaio à compressão com o objetivo de comparar a argamassa referência (GMP0%) com as argamassas com substituição de cimento por pó de mármore e verificar se existiram perdas significativas de resistência.

Por fim, foi selecionada a argamassa com substituição parcial de cimento por pó de mármore ótima para impressão, para de seguida se realizar a impressão 3D do produto como descrito no “Capítulo 4 – Desenvolvimento do Produto”.

3.2 Materiais Constituintes

3.2.1 Pó de Mármore: Origem do resíduo e tratamento em Laboratório

Foi realizada uma visita à *TCC Whitestone - Marble Crafters* empresa dona da marca MAAMI, uma empresa que transforma o mármore em peças de mobiliário de interiores e decoração. A visita iniciou-se com uma breve entrevista ao fundador da empresa, Engenheiro Sérgio Costa, e a dois designers da marca, com a finalidade de conhecer melhor a empresa, a origem do mármore que trabalham, como é o processo de descarte da matéria-prima e principalmente a quantidade de resíduo de mármore gerado pela empresa.

Após a entrevista, foi realizada uma visita ao centro de produção, local onde foram apresentadas as tecnologias usadas na criação das peças e onde foi explicado o processo e respetivo circuito de reciclagem do resíduo de mármore. Por fim, foram disponibilizados aproximadamente 40kg de pó de mármore (resíduo) pela MAAMI, permitindo, portanto, o desenvolvimento da argamassa – crucial para a presente investigação.

No fim da visita, o resíduo de mármore foi transportado até ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção na FEUP. O destino final destes resíduos são geralmente os aterros.

Segue-se uma sucinta descrição da origem das lamas de mármore nesta empresa.

Etapa 1 - Processamento da Matéria-Prima

A origem do resíduo de pó de mármore advém do seu processamento fabril da matéria-prima (blocos de mármore), como se observa na Figura 12, o corte e polimento, respectivamente.



Figura 12 – Corte e polimento do Mármore respectivamente.

Etapa 2 - Iniciação do processo de descarte do resíduo

Cada máquina na fábrica e local de trabalho tem um contentor onde o pó do mármore é armazenado até se juntar com a água para assim começar o trajeto até aos *BigBags* (sacos industriais grandes).



Figura 13 – Pó do mármore misturado com a água.

Etapa 3 - Trajeto do resíduo pela canalização

Os contentores após ficarem cheios são abertos aos canais de saneamento que levam esse resíduo agora em formato de lama até ao primeiro tanque de filtragem.



Figura 14 – Pó de Mármore a passar pelos canais de saneamento.

Etapa 4 - Filtragem em tanques

O trajeto dos canais de saneamento leva o pó em direção aos tanques de filtragem, um conjunto de três tanques que executam o processo de filtragem, o seu objetivo está em separar a maior parte da água que está misturada com o pó de mármore.



Figura 15 – Tanque 1 e 2 respetivamente.

Etapa 5 - Drenagem do Pó nos *BigBags*

O tanque 3 despeja o pó em *BigBags* para armazenamento. Estes depois de cheios com pó de mármore e floculante ficam a secar até toda a água desaparecer (Figura 16).



Figura 16 – 3º Tanque a despejar o pó de mármore filtrado e *BigBag* cheio a secar, respetivamente.

Etapa 6 - Armazenamento

Após este processo, todo o residuo de mármore está pronto para ser descartado num aterro. O resíduo é armazenado em *BigBags* no exterior até ser transportado para aterro (Figura 17)



Figura 17 – Resíduos de Mármore: Rosa, Cinzento-Claro e Cinzento-Escuro por esta ordem.

Após a recolha de amostras, procedeu-se ao seu tratamento á escala laboratorial, nomeadamente a secagem e desagregação. Segue-se uma descrição sucinta desse processo:

Etapa 1 – Secagem

A primeira etapa do tratamento do resíduo de mármore foi a sua secagem, em estufa a 100 ± 2 C° até massa constante (Figura 18).



Figura 18 – Resíduo de Mármore em estufa a 100 ± 2 C° até obter massa constante

Etapa 2 - Desagregação manual

A secagem deu origem a aglomerados de pó de mármore, como se ilustra na Figura 19-a. Assim sendo, procedeu-se a uma desagregação manual utilizando um almofariz metálico (Figura 19-b).

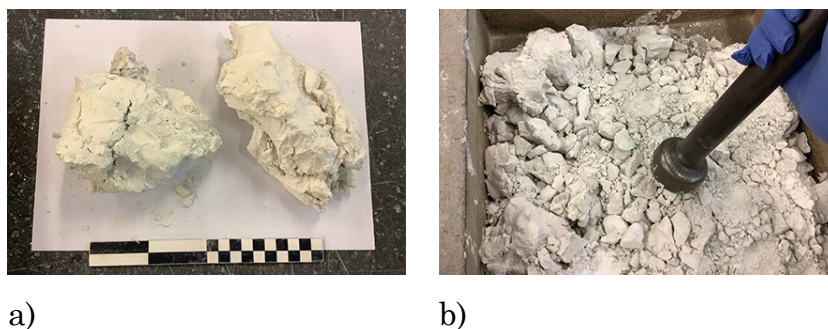


Figura 19 – a) Resíduo de Mármore após secagem; b) desagregação com pilão do Resíduo de Mármore seco.

Etapa 3 - Desagregação mecânica na máquina de Los Angeles

Para uma eficaz desagregação e homogeneização, o resíduo de mármore utilizou-se uma máquina de Los Angeles disponível no Laboratório de Materiais de Construção da FEUP.



Figura 20 – Mistura dos 3 tipos de Resíduos de Mármore

Foi utilizado um rácio 1:1, peso de bolas metálicas e peso da amostra com um tempo de duração de 30 minutos como podemos verificar na Figura 21.



Figura 21 – Moagem na máquina de Los Angeles durante 30 minutos

O produto final é o que se apresenta na Figura 22.



Figura 22 – Resultado do processo de moagem no Los Angeles – Pó de mármore

Após o tratamento em laboratório, procedeu-se à caracterização química e física do pó de mármore, que se descreve em seguida.

A Tabela 1, resume a composição química do Pó de mármore, através da análise de elementos maiores pelo método de espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) e a perda ao rubro seguindo o procedimento da NP EN 196-2. Os resultados apresentam-se na Tabela 1.

A distribuição granulométrica do pó de mármore foi realizada pelo método laser, conforme apresentado na Figura 23. Como se depreende, o pó de mármore apresenta uma granulometria similar à do cimento (apresentada na seção 3.2.2), nomeadamente, $d_{10}=1.081$, $d_{50}=7.038$ e $d_{90}=25.94 \mu\text{m}$.

A massa volúmica do pó de mármore foi determinada de acordo com a especificação LNEC E-64 e foi obtido um valor de 2720 kg/m³, sendo inferior ao cimento.

Tabela 1 – Análise de elementos maiores do Pó de Mármore

Elementos	%
SiO ₂	5,88
Al ₂ O	1,12
Fe total (Fe ₂ O ₃)	0,51
MnO	0,08
CaO	47,53
MgO	3,19
Na ₂ O	<0,20
K ₂ O	0,30
TiO ₂	<0,04
P ₂ O ₅	0,08
P.Rubro	41,08

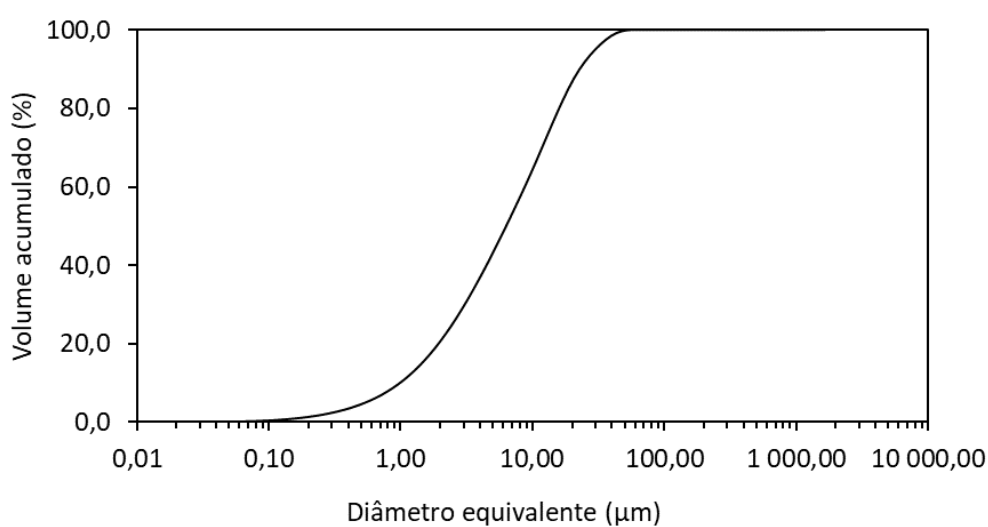


Figura 23 – Curva Granulométrica do GMP

3.2.2 Cimento

O Cimento Branco Portland CEM II /B-L 32.5 R pertence à família de cimentos correntes coberta pelas Normas Europeias de cimentos NP EN 197-1. Este tipo de cimento se bem medido e misturado com água, e superplastificante permite a criação de argamassas e de betão atingindo níveis de resistência específicos bem como estabilidade volúmica a longo prazo. O Cimento CEM II/B-L 32.5R foi utilizado neste estudo devido à necessidade de um ligante, neste caso hidráulico, para aglomerar as partículas de pó de mármore, que por si só não têm propriedades ligantes. Não obstante, o cimento Portland endurece praticamente em todos os ambientes habitáveis sem necessidade de qualquer tratamento. Finalmente o cimento escolhido é amplamente e abundantemente aplicado no mercado nacional bem como na maioria dos países europeus.

O fabricante disponibiliza as propriedades químicas, físicas e mineralógicas, no âmbito de ensaios realizados no controlo de qualidade do cimento, tal como apresentado na Tabela 2. Adicionalmente, a distribuição granulométrica do cimento foi determinada pelo método laser. Antes da análise, as amostras foram dispersas em isopropanol com ultrassons durante 1 minuto. A Figura 24 apresenta a distribuição granulométrica das partículas do cimento utilizado, sendo $d_{10}=0.915$, $d_{50}=7.496$ e $d_{90}=25.9 \mu\text{m}$.

Tabela 2 – Análise Química, Física e Mineralógica do CEM II/B-L

	Tipo de Análise	Mês		Ano
Análise Química	Perda ao Fogo (%)	14,80		15,04
	Resíduo Insolúvel (%)	0,21		0,33
	SiO ₂	15,48		15,49
	Al ₂ O ₃	1,83		1,87
	Fe ₂ O ₃	0,18		0,17
	CaO	64,58		64,41
	MgO	0,38		0,35
	SO ₃	2,55		2,50
	K ₂ O	0,24		0,20
	Na ₂ O	0,04		0,04
	Na ₂ Oeq	0,22		0,17
	Cl	0,00		0,00
	Cal Livre (%)	-		-
Ensaio Físicos	Tempos de presa	Início	120	127
		Fim	170	181
	Massa volúmica (kg/m ³)	2.94		2.93
Análise Mineralógica	Silicato Tricálcico (%)	46.7		47.7
	Silicato Bicálcico (%)	12.2		10.1
	Aluminato Tricálcico (%)	1.7		1.9
	Ferro-aluminato Tetracálcico (%)	-		-

Tabela 3 – Características Mecânicas do CEM II/B-L

Resistência à compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 10	-	$\geq 32,5$ e $\leq 52,5$

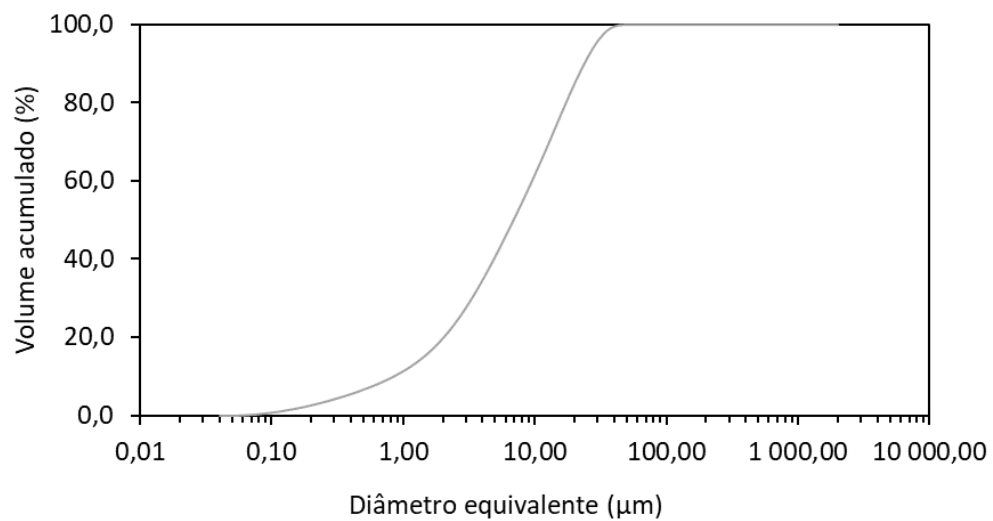


Figura 24 – Curva Granulométrica do Cimento Branco Portland CEM II /B-L 32.5 R

3.2.3 Agregado

Areia natural siliciosa com máxima dimensão 1 mm, massa volúmica 2580kg/m³ e absorção de água 0,5%. A análise granulométrica da areia apresenta-se na Figura 25, sendo neste caso realizada pelo método de peneiração (obtenção de granulometria de agregados através da utilização de peneiros de ensaio) de acordo com a NP EN 933-1.

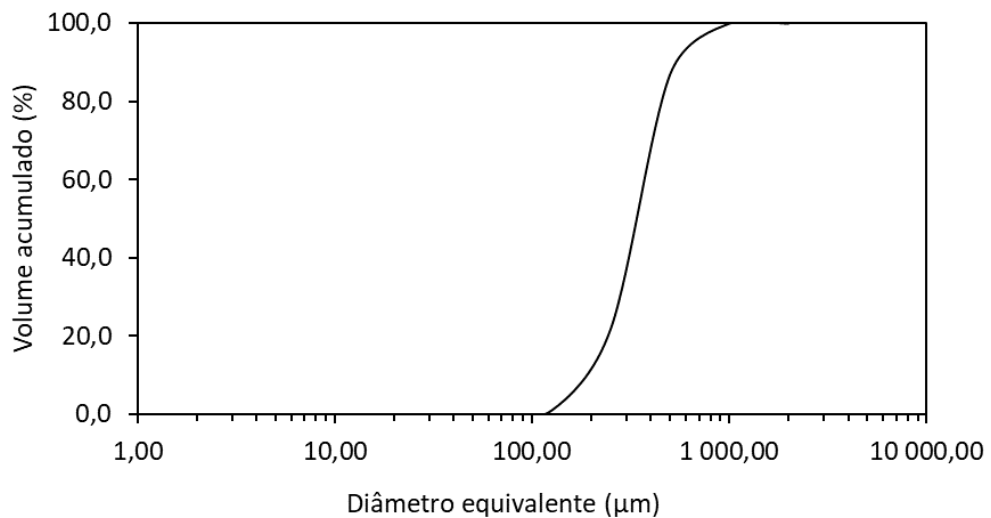


Figura 25 – Curva Granulométrica da Areia

3.2.4 Superplastificante

O Sika® ViscoCrete®-5501 é um superplastificante de elevado desempenho com a função de atuar na água através da adsorção superficial e efeito espacial. O superplastificante foi utilizado para permitir uma dispersão eficiente das partículas de cimento, do pó de mármore e a redução da quantidade de água na argamassa, as suas características apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do Produto Sika® ViscoCrete®-5501

Dados do Produto	
Base química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados
Fornecimento	214 kg (bidão), 1070 kg (IBC), granel
Aspecto / Cor	Líquido incolor, levemente turvo
Tempo de armazenamento	12 meses após a data de fabrico
Armazenagem e conservação	Armazenado nas embalagens originais não encetadas e não deterioradas em ambiente seco e a temperatura entre +5 °C e +35 °C. Proteger da luz solar direta.
Massa volúmica	1,07 ± 0,02 kg/l (a +20 °C)

3.3 Produção das argamassas

Com a finalização do pré-tratamento do resíduo de mármore deu-se início ao estudo de composições para determinar quais as percentagens de pó de mármore mais adequadas para o desenvolvimento de uma argamassa para impressão 3D, visando a redução do cimento na sua composição. Isto trará uma redução nos custos de produção e, ainda, contribui para a diminuição de emissões de CO₂ originadas na produção do cimento.

No estudo de composições foram testadas diferentes dosagens de substituição parcial de cimento em massa por GMP, nomeadamente, 0% (argamassa de referência tendo apenas cimento como ligante), 5%, 10%, 20% e 50%, sendo as argamassas designadas por GMP0%, GMP5%, GMP10%, GMP20% e GMP50%, respetivamente. As composições estudadas apresentam-se na Tabela 5. Cada argamassa foi produzida num volume de 1.2 m³ e o procedimento de amassadura usado para obter uma argamassa homogénea através da mistura de todos os elementos, é apresentado nas Figura 26 e Figura 27.

Tabela 5 – Composições estudadas para um volume de 1.2L

	GMP0-1	GMP0-2P	GMP5	GMP10-1	GMP10-2	GMP10P	GMP20	GMP20P	GMP50
Cimento (g)	1356	1356.00	1288.20	1212.00	1212.00	1212.00	1104.00	1104.00	870.00
Pó de Mármore (g)	0	0.00	64.41	121.20	121.20	121.20	220.80	220.80	435.00
Areia	906	906.00	906.00	906.00	906.00	906.00	906.00	906.00	906.00
Superplastificante 1º	7.65	5.40	5.40	7.20	5.63	6.10	6.07	6.40	7.50
Superplastificante 2º	2.55	1.80	1.80	2.40	1.88	2	1.98	1.28	5.63
Água 1º	254.4	240	240	240	240	240	240	240	240
Água 2º	63.6	60	60	60	60	60	60	60	60



a) b) c) d) e)

Figura 26 – Pesagem dos materiais constituintes da argamassa: a) Cimento Branco Portland CEM II 32.5 R B-L; b) Areia; c) GMP; d) Água; e) Sika® ViscoCrete®-5501

A produção das argamassas iniciou-se com a pesagem dos materiais constituintes (Figura 26).

As argamassas foram produzidas numa misturadora de acordo com a NP EN 196-1 (Figura 27) e segundo o seguinte procedimento esquematicamente na Figura 28.



Figura 27 – Processo de Amassadura no Mortar Mixer

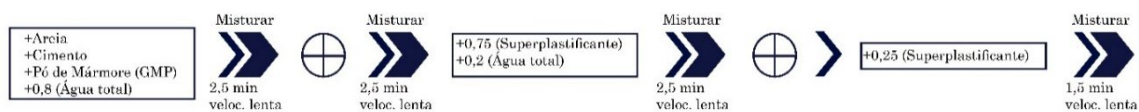


Figura 28 – Esquema do processo de amassadura

3.4 Ensaio de Espalhamento

Imediatamente após a produção de cada argamassa, foi realizado o ensaio de espalhamento de acordo com a EN 12350-5. Posteriormente foram moldados provetes prismáticos ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) para aferição das resistências mecânicas aos 14 dias de idade. Os provetes foram moldados numa única camada e compactados numa mesa vibratória durante 30 segundos. Após 24h, procedeu-se à desmoldagem, mantendo os mesmos em água num ambiente controlado de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ até à data de realização dos ensaios.

O procedimento consistiu nos passos da Figura 29. O compósito fresco foi colocado no centro da mesa e dentro dum molde troncocónico em 2 camadas, compactadas com 15 pancadas cada uma. Posteriormente, o molde foi retirado na direção vertical e num único movimento, e a mesa foi de imediato caída de uma altura de 12,5 mm, 15 vezes em 15 segundos. Por último, mediram-se 2 diâmetros perpendiculares, sendo o valor médio o resultado deste ensaio, ou seja, o espalhamento.

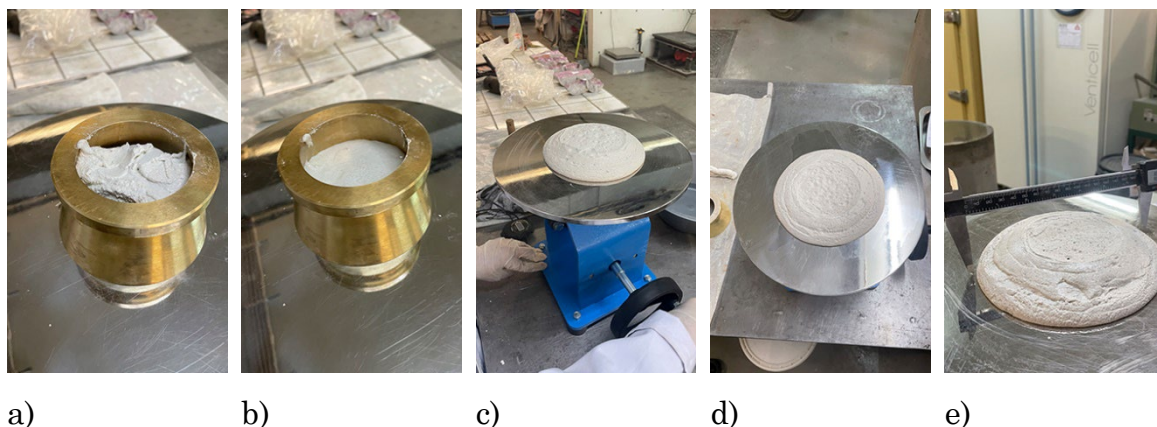


Figura 29 – Visualização do processo de ensaio de espalhamento, a) compósito na mesa; b) compósito tamponado 25 vezes; c) molde retirado para tamponar 25 vezes em 15 segundos a uma altura de 12,5mm; d) Esperar que o compósito pare; e) medição dos diâmetros perpendiculares

3.5 Teste de Extrusão Manual

Para avaliar de uma forma empírica e de fácil execução a capacidade de extrusão e construtibilidade realizou-se um teste de impressão manual, utilizando um saco de pasteleiro com um bocal plástico de 20 mm de diâmetro.

Após o ensaio de espalhamento encheu-se o saco de pasteleiro com a argamassa fresca e, exercendo pressão manual imprimiram-se 3 *layers* de argamassa com 10 cm de comprimento. Os resultados para cada argamassa passível de impressão mostram-se na Figura 30.



Figura 30 – Testes de extrusão manual das argamassas GMP0%, GMP5%, GMP10%, GMP20% e GMP50%

3.6 Determinação das Resistências Mecânicas

A determinação das resistências mecânicas foi realizada de acordo com a NP EN 196-1 em provetes prismáticos com as dimensões de 40mm x 40mm x 160mm como ilustrado na Figura 31.

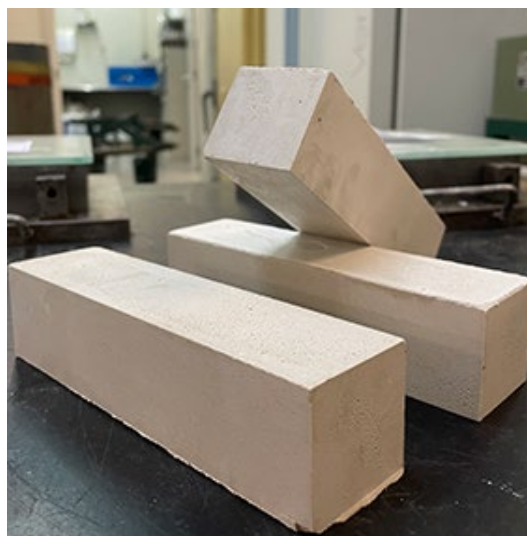


Figura 31 – Provetes prismáticos com dimensão 40mm x 40mm x 160mm para ensaio de resistências mecânica.

Os provetes desmoldados foram colocados em cura húmida compressão uma temperatura de 20°C até à data de ensaio (4 dias). Partiram-se os provetes em duas metades determinando a sua resistência à flexão, seguidamente cada metade foi sujeita ao ensaio de compressão.

3.6.1 Ensaio à Flexão

Para a realização deste ensaio teve-se primeiramente de colocar o provete na máquina de ensaio com as duas faces moldadas sobre os 3 apoios, ver Figura 32. Foi aplicada uma carga em sentido vertical numa velocidade uniforme até à rotura do provete como podemos observar na Figura 32. Por fim, conservou-se o semi-prisma com um pano humedecido até ao início do ensaio de compressão.

Na Tabela 6 em (anexos) pode-se analisar os resultados obtidos de todos os provetes no ensaio à flexão. Ao todo foram analisados 27 provetes com percentagens de GMP entre os 0% a 50%, com a finalidade de testar e comparar os resultados obtidos de modo a perceber se o GMP, como material constituinte nas composições, seria um fator comprometedor mecanicamente das argamassas.



Figura 32 – Ensaio à flexão de um provete GMP.

A resistência à flexão do provete é calculada através da seguinte formula:

$$\text{Resistência à flexão do provete} = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Onde:

F_f - carga de Rotura (N);

l - distância entre os apoios, em milímetros;

b - lado da secção quadrada do prisma, em milímetro.

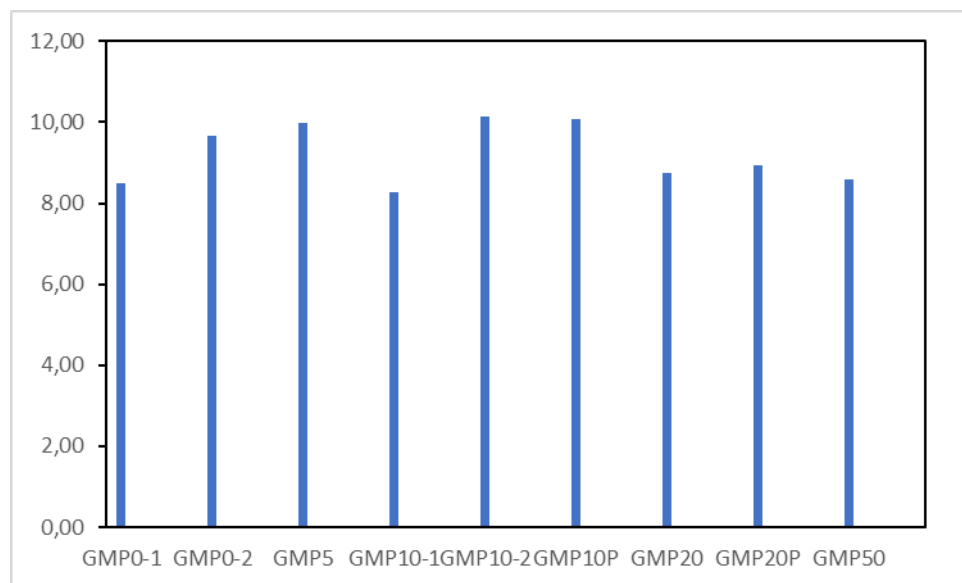


Figura 33 – Média dos resultados obtidos no ensaio à flexão do GMP.

Após este ensaio, verificou-se que as composições com GMP como material constituinte na composição não apresentam grandes perdas significativas de resistência à flexão comparativamente às composições base (sem adição do pó de mármore como material constituinte) como se pode ver na Tabela 6 que se encontra nos anexos, a GMP 0-1 e a GMP 0-2P. Visto que estas composições se destinam para a criação de um produto de adorno imprimível em 3D, onde o desempenho das propriedades mecânicas não é um fator decisivo, pode-se concluir que os resultados obtidos são satisfatórios e que não irão interferir com a viabilidade dos produtos desenvolvidos com este material.

3.6.2 Ensaio à Compressão

Para o ensaio à compressão foram usados todos os semi-prismas obtidos no ensaio à flexão (Figura 32). As arestas moldadas dos semi-prismas são as que entram em contacto com as faces da máquina onde uma carga de compressão foi aumentada, a velocidade constante, até à rotura do semi-prisma como se pode observar na Figura 34.



Figura 34 – Ensaio à compressão de um provete de GMP.

A resistência à compressão é obtida pela seguinte equação:

$$\text{Resistência à compressão do provete} = \frac{F_c}{1600}$$

Onde:

F_c - carga de Rotura;

1600 – área dos pratos (40mm x 40mm), milímetros quadrados.

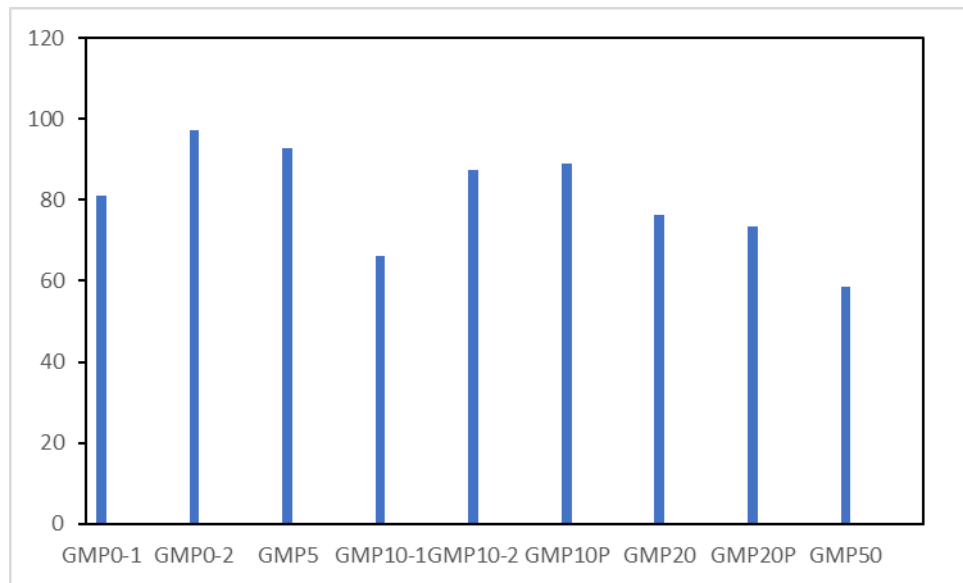


Figura 35 – Média dos resultados obtidos no ensaio à compressão

Neste ensaio, ao contrário do ensaio à flexão notou-se uma maior perda das capacidades mecânicas das composições com GMP como se pode observar na Tabela 7 que se encontra em anexo, especialmente a composição GMP50 onde foi registado uma resistência à compressão média de 58,7 MPa, isto comparado com a composição sem GMP, a qual foi a mais alta registada, 98,7 MPa.

3.7 Análise dos Resultados

Este capítulo pretendeu demonstrar a competência do pó de mármore como substituto parcial do cimento numa argamassa para impressão. Como referido, para que uma argamassa cimentícia obtenha as condições ótimas de impressão é preciso ter em consideração 3 requisitos, a Trabalhabilidade, a Extrusabilidade e a Capacidade de Construção de forma que uma das composições desenvolvidas seja apta para impressão. Adicionalmente é necessário atingir resistência mecânica adequada ao produto a desenvolver.

Numa primeira fase foi feita uma breve caracterização dos materiais que iriam estar integrados na composição destas argamassas, começando pelo pó de mármore cujo objetivo é desempenhar a função de material inerte e de substituição parcial do cimento, o cimento e a água como ligante de todos os materiais constituintes na composição, a areia como agregado e por fim o superplastificante como material adjuvante para ajudar na dispersão dos materiais finos (cimento + pó de mármore) da argamassa.

Para testar o desempenho do pó de mármore em argamassas cimentícias foi dado início à fase da produção das mesmas, onde se desenvolveu ao todo nove argamassas com percentagens de pó de mármore diferentes. O alcance das composições com GMP foram de GMP0% (argamassa de referência contendo apenas cimento como ligante), GMP5%, GMP10%, GMP20% e GMP50%.

De modo a averiguar qual composição a escolher para impressão, submetemos as argamassas a testes no seu estado fresco (ensaio de espalhamento e teste de extrusão manual) e posteriormente, com 14 dias de cura (ensaio à flexão e compressão). O ensaio de espalhamento foi realizado em todas as composições logo após o processo de amassadura, o objetivo deste ensaio era determinar a consistência e fluidez das argamassas, concluiu-se que não houve uma perda de fluidez significativa à medida que a quantidade de cimento era

reduzida e a percentagem de pó de mármore aumentada. Os testes de extrusão manual também comprovam que a consistência e facilidade de impressão apesar de decrescer consoante o aumento da percentagem de GMP não é alterado. Através destes dois testes é possível concluir que o aumento da percentagem de pó de mármore como substituto parcial do cimento numa argamassa de impressão mantem a construtibilidade da impressão e a estabilidade dimensional dos *layers* (*Buildability*) sem afetar de forma prejudicial a capacidade de a manipular (*Workability*) e de ser extrudida de forma consistente (*Extrudability*). Todavia, a dosagem foi necessário aumentar a dosagem de superplastificante com o aumento da dosagem de pó de mármore incorporado na mistura. Este adjuvante tem um custo significativo, apesar de utilizado em pequenas quantidades relativamente aos demais materiais constituintes.

Depois de testar as composições no seu estado fresco, estas passaram pelo processo de cura de 14 dias, de modo a realizar a determinação das resistências mecânicas, o ensaio à flexão e à compressão. Foi possível concluir que no ensaio à flexão, os níveis de flexão média não se alteravam substancialmente quando comparado-as composições com e sem pó de mármore. Relativamente ao ensaio à compressão, os resultados foram satisfatórios, contudo verifica-se a redução da resistência à compressão com o aumento da dosagem de pó de mármore. Por exemplo, a composição GMP50% (composição com maior percentagem de pó de mármore) apresentou uma perda de 39.7% de resistência à compressão média comparativamente à composição de referência GMP0%.

Com base nestes ensaios concluímos que a argamassa com melhores propriedades para a impressão é a argamassa GMP20%, pois apresentou uma boa impressão e resistências mecânicas relativamente à percentagem de pó de mármore usado. Assim sendo, o novo produto produzido com esta composição através de impressão 3D.

4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Neste capítulo serão apresentadas as peças de estudo que comprovam a viabilização da impressão 3D de possíveis produtos que contenham argamassas com pó de mármore como material primário.

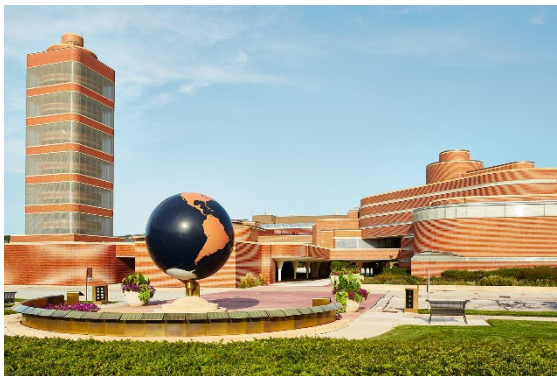
A partir dos estudos de composições realizados no capítulo anterior e das referências abordadas no estado da arte, foi idealizado dois produtos que pudessem validar a utilização do pó de mármore em argamassas para a Impressão 3D de Produtos. Os produtos escolhidos foram uma jarra e uma mesa de centro.

A primeira peça impressa foi a jarra, de pequena dimensão e cilíndrica. Este produto teve como objetivo verificar a possibilidade de impressão da argamassa e realizar eventuais acertos, por vezes necessários no processo de aumento de escala. Por outro lado, por motivos logísticos é preferível utilizar pequenos volumes.

Após a impressão da jarra, passou-se para o desenvolvimento do produto final, ao fazer a mesa de centro, de linhas orgânicas e de dimensões significativamente maiores comparado as da jarra, o desafio foi verificar como a argamassa respondia à impressão de um produto de maiores dimensões.

4.1 Definição do Conceito

A liberdade de formas que a impressão 3D proporciona e a facilidade que tem em produzir produtos de formas complexas, que muitas vezes não seriam possíveis ou extremamente complexas, noutro tipo de tecnologias, como por exemplo, o uso de moldes. Foi idealizada uma mesa de centro de silhueta orgânica com linha curvas e pouco simétricas inspirada nos conceitos aplicados na (*Johnson Wax Building*) de *Frank Lloyd Wright* (Figura 36), nos produtos de linhas curvas e geométricas desenhados por *Alvar Aalto* no caso da (*Pamio chair e Tea Trolley*) (Figura 37) e por fim na (*Organic House*) concebida por *Javier Senosiain* (Figura 38).



a)



b)

Figura 36 – a) “*Campus Facing East*”, (Virtual Tours of SC Johnson’s Global Headquarters, n.d.) e b) “*Workroom in Administration Building*”, (SC Johnson’s Frank Lloyd Wright Buildings: You’re Always Welcome for Tours, n.d.)



a)



b)

Figura 37 – a) Paimio Chair de Alvar Aalto, imagem de Artek (Souza, 2021); b) Tea Trolley de Alvar Aalto, (*Tea Trolley, Designed by Alvar Aalto for Artek — Modernity*, n.d.)



a)



b)

Figura 38 – Interior da Organic House de Javier Senosiain (*Organic House / Javier Senosiain | ArchDaily*, n.d.)

Estas inspirações originaram o desenvolvimento de vários esboços (Figura 39) de mesas de centro na pesquisa, exploração e procura de possíveis formas e silhuetas preliminares de modo a tornar o conceito em algo visual como está apresentado na Figura 39.

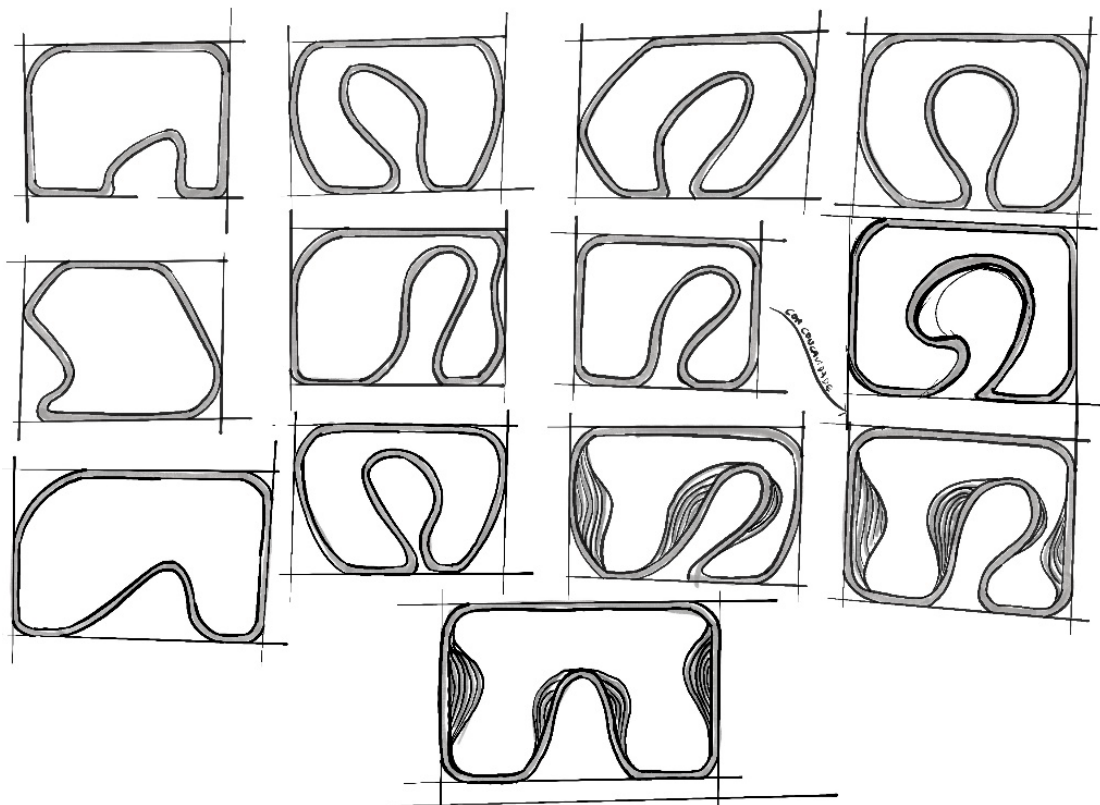


Figura 39 – Esquícios de silhuetas de mesas de centro

Na Figura 39, podemos reparar que o uso de linhas curvas e fluidas dão um aspeto orgânico às mesas de centro, nomeadamente a concavidade projetada no centro das peças, aliado aos cantos arredondados de dimensões irregulares.

A partir das variadas silhuetas obtidas através dos esquícios, passou-se para a modelação 3D de modo a definir cuidadosamente as dimensões e a silhueta final da peça a ser impressa.

4.2 Criação de Modelos Tridimensionais

O desenvolvimento dos vários modelos tridimensionais foram realizados com base nos esboços previamente desenvolvidos na Figura 39.

A finalidade da modelação 3D nesta fase foi a de projetar digitalmente aquilo que poderia vir ser a peça final a ser impressa, deste modo, tomou-se em consideração as dimensões das modelações desenvolvidas, a volumetria em litros das mesmas e as limitações/constrangimentos que só através deste processo é que consegue analisar.

O processo de seleção da modelação final da mesa de centro passou pela realização de várias peças dentro do mesmo estilo e conceito como podemos ver na Figura 40. Procurou-se encontrar a forma ideal para as limitações exigidas devido ao tipo de produto que se estava a desenvolver e à tecnologia e máquina na qual iria ser realizado a impressão da peça, deste modo, a mesa de centro ideal para a impressão teria dimensões entre 400mm a 500 mm de altura, 550mm a 800mm de comprimento e 400mm a 500mm de largura e uma volumetria máxima de 27 litros, uma vez que a produção tem um volume máximo de 30 litros de cada vez.

O constrangimento da volumetria definido para aproximadamente 27 litros levou a que a complexidade das peças fosse reduzida e as concavidades projetadas nas imagens a), c) e e) da Figura 40 fossem removidas, pois, para além de aumentar significativamente a volumetria da peça, ainda poderiam causar problemas de inercia na altura da impressão, visto que as camadas inferiores poderiam não suportar as camadas que contornavam as concavidades das peças.

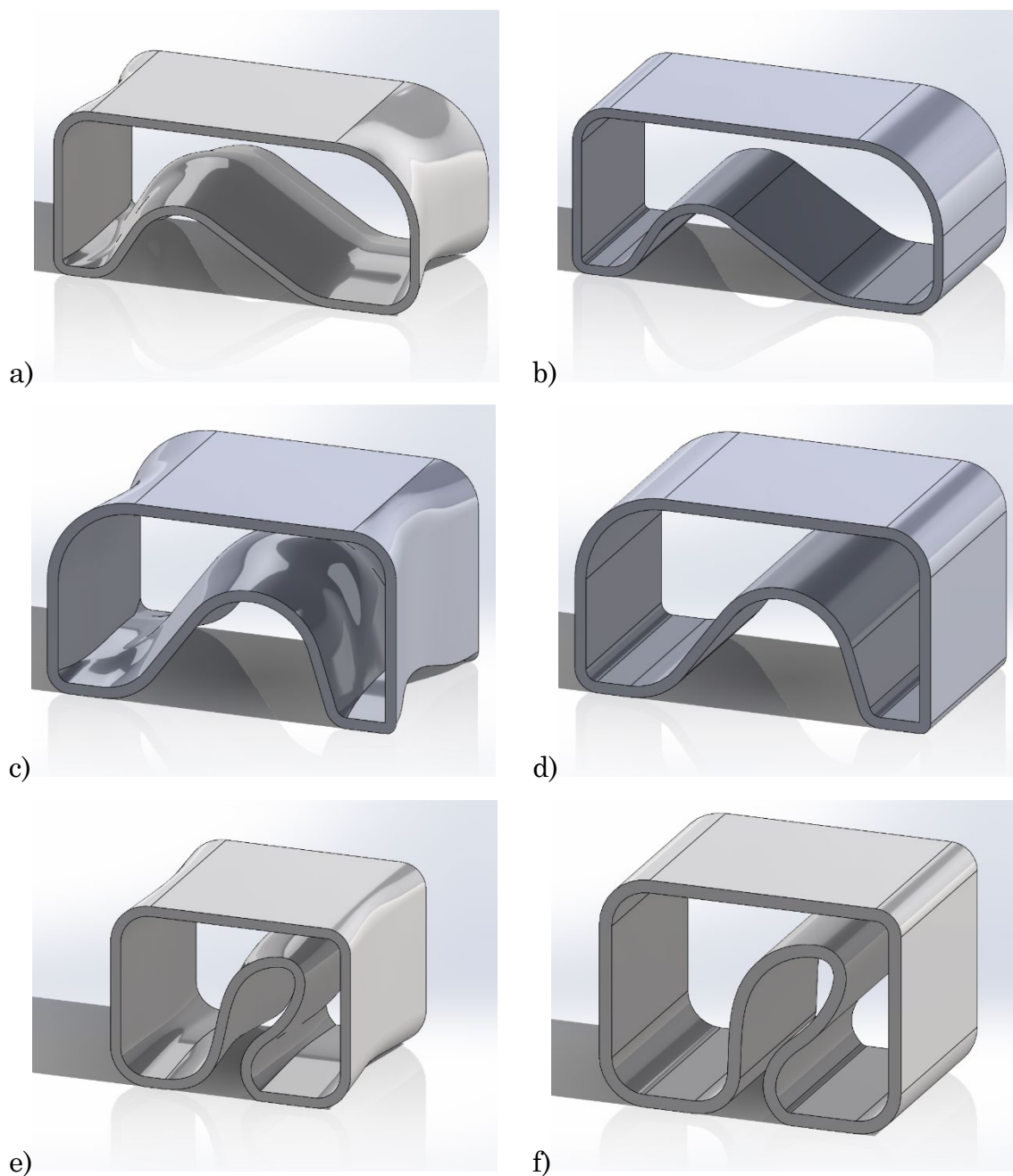


Figura 40 – Modelação para a criação do contorno estrutural, dimensionamento e controlo volumétrico utilizando o software Solidworks. a) Modelação peça 1: vol. 32,77L; b) Modelação peça 2: 31,05L; c) Modelação peça 3: vol. 29,51L; d) Modelação peça 4: vol. 28.38L; e) Modelação peça 5: vol. 31,23L; f) Modelação peça 6: vol. 25,8L.

A modelação escolhida para prosseguir para a impressão foi a mesa de centro f), da Figura 40, uma versão mais simples e de menor volumetria e dimensão da mesa a), como podemos visualizar no desenho técnico representado na Figura 41.

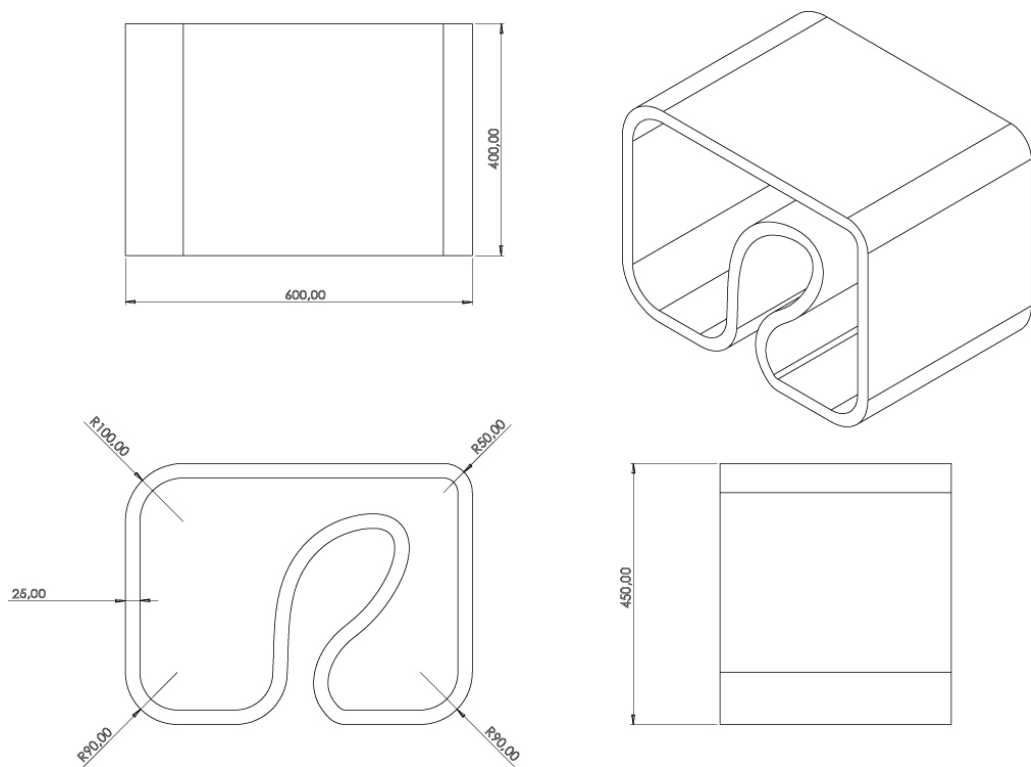


Figura 41 – Desenho técnico da modelação final

4.3 Renderização

Uma vez criado o modelo tridimensional final, converteu-se o documento de Solidworks, para código G (código de programação que permite ordenar máquinas a executar algo, neste caso, a impressora 3D) (CAM), para posteriormente ser aplicado um material e textura da composição cimentícia com foco na aproximação visual do que iria ser o resultado da peça impressa.

A realização deste procedimento começou pela conversão do código G do software “Prusa Slicer” (Software fatiador para impressão 3D) para um ficheiro OBJ com o objetivo de renderizar a peça como podemos ver na Figura 42.

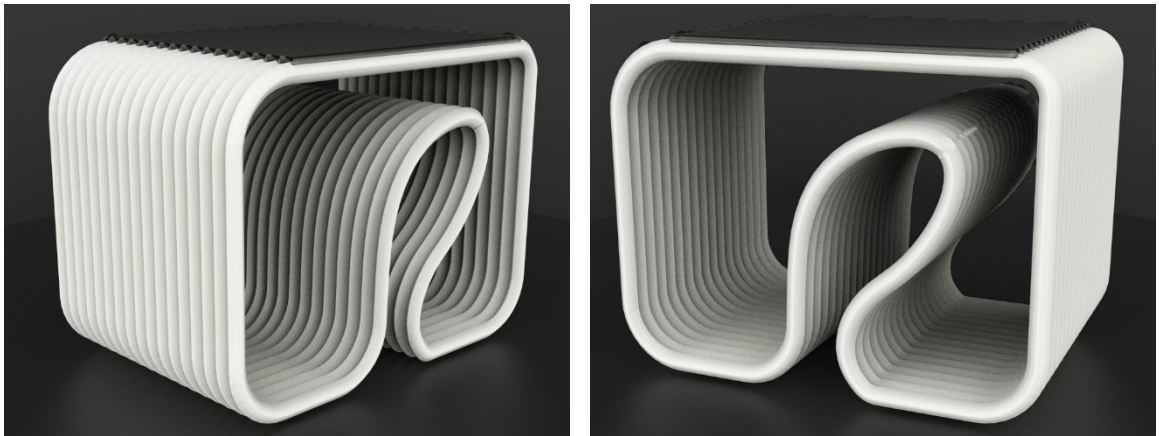


Figura 42 – Renderizações da mesa de centro

4.4 Impressão 3D do Produto

4.4.1 Impressão Teste - Vaso

Nesta fase do projeto foi necessário proceder-se algumas etapas até à impressão final da mesa de centro, para se determinar se a composição escolhida era adequada para a realização da mesa de centro. Foi feito uma impressão teste de um vaso cilíndrico de volumetria reduzida, de modo a não desperdiçar grandes quantidades de materiais e recursos.

Primeiramente foi desenvolvido a modelação 3D do vaso no SolidWorks (Figura 45). Este passo serviu para determinar exatamente a volumetria do objeto e também as suas dimensões. Para converter o ficheiro de modelação previamente realizado em código, transferiu-se o ficheiro para o software de corte Prusa Slicer (Figura 46). Após a criação do ponto G, foi realizado uma renderização com o intuito de visualizar de forma digital o vaso com o material como pode ser visto na Figura 47.

A impressão teste foi impressa na impressora 3D “Bemore 3D – SMART” disponível no Laboratório de Estruturas da FEUP, ver Figura 43 e Figura 44. Por fim, foi definido a escolha do bocal de menor diâmetro disponível para a máquina, o de 25mm, pois daria *layers* relativamente mais finos e o consumo de material também seria reduzida comparativamente aos outros bocais disponíveis.

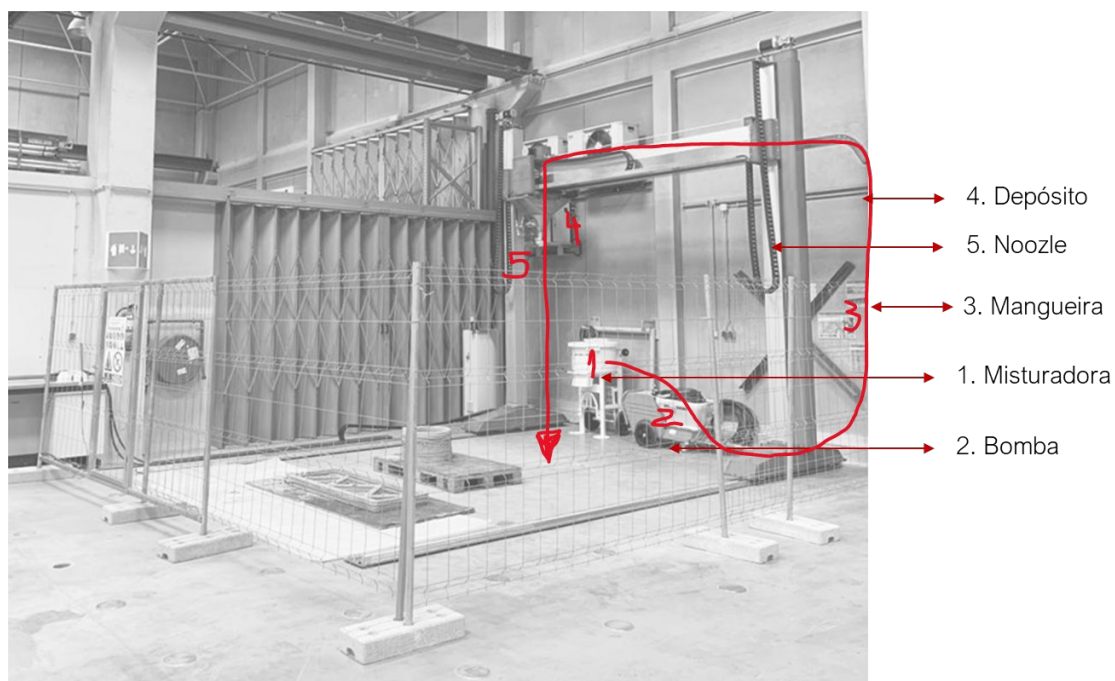


Figura 43 – Numeração dos componentes da impressora “Bemore 3D – SMART”.



Figura 44 – Impressora 3D “Bemore 3D – SMART”

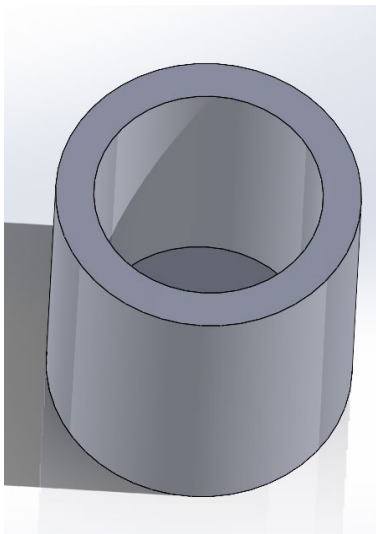


Figura 45 – Modelação 3D do vaso no SolidWorks.

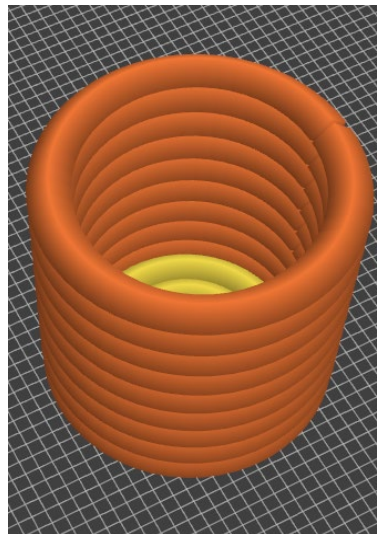


Figura 46 – Transformação da modelação 3D do vaso para no PrusaSlicer.



Figura 47 – Renderização do vaso.



Figura 48 – Impressão do vaso.



Figura 49 – Vaso impresso.



Figura 50 – Vaso seco.

A impressão teste (Figura 48), apresentou uma capacidade de impressão satisfatória, foram impressas 11 camadas para a realização do vaso, 1 camada base e 10 de contorno, concluindo assim que o material estava apto a ser impresso visto que as camadas de baixo suportavam as camadas seguintes

mostrando um bom nível de inércia. O processo de extrusão do material sucedeu-se continuamente demonstrando assim que a composição apresentava uma capacidade de fluxo suficiente para a impressão. Observou-se que era estritamente necessário realizar o “*skirt*” (contorno inicial que rodeia a peça sem tocar na mesma) mais que uma vez, pois, ao usar o retardador para concreto na composição, notou-se que a mesma ficava muito líquida nos primeiros minutos o que originou na necessidade de recolocar o material na extrusora novamente para se prosseguir com a impressão.

4.4.2 Impressão Final - Mesa de Centro

Após a impressão teste ter sido realizada e a informação pertinente assimilada, partiu-se para a impressão final (Figura 54, Figura 55 e Figura 56), onde a composição previamente testada foi utilizada mais uma vez, aumentando proporcionalmente a quantidade de material utilizado, tendo em conta que, para a impressão do vaso, foi usado aproximadamente 6,4 L da composição, enquanto para a mesa de centro, foi 27 L.

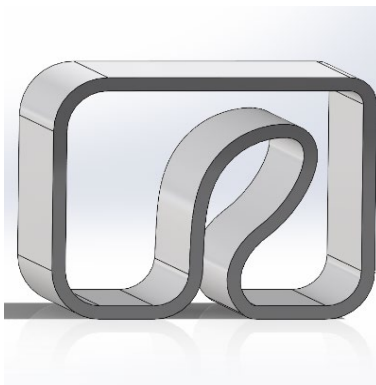


Figura 51 – Modelação 3D final da mesa de centro no SolidWorks.

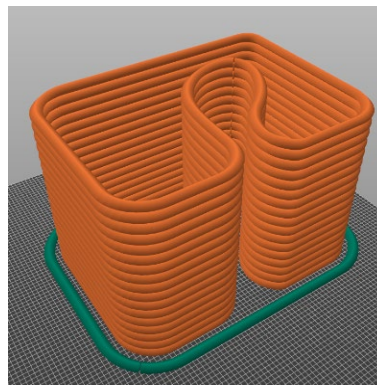


Figura 52 – Transformação da modelação 3D da mesa de centro para código G no PrusaSlicer.

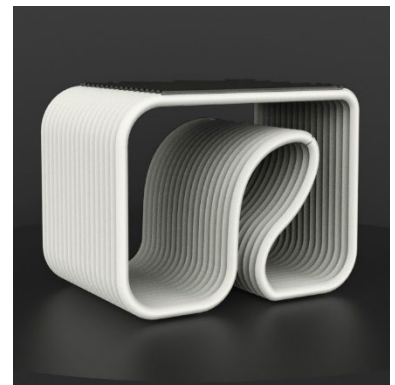


Figura 53 – Renderização do código G da mesa de centro.



Figura 54 – Impressão da mesa de centro.



Figura 55 – Mesa de centro impressa.



Figura 56 – Mesa de centro seca.

O resultado da impressão da mesa de centro consistiu no total de 8 *layers* (camadas) de altura, ficando aquém da expectativa visto que a espessura das camadas foi esbatida o que resultou no precoce consumo total do material e a consequente diminuição de largura da mesa de centro passando de 400mm de largura para aproximadamente 160mm. Como podemos averiguar através da Figura 54, as primeiras camadas impressas expandiram o dobro em largura o que levou ao maior consumo de material por camada resultando numa impressão que não conseguiu cumprir com a largura previamente definida na modelação. Este problema originou-se através da falta de consistência/rigidez apresentada na impressão, o material não conseguiu manter as suas dimensões quando já se encontrava em repouso o que levou à progressiva expansão de largura à medida que mais camadas iam sendo impressas.

Analisando os resultados conseguimos aferir que trabalhar com grandes volumes requer um maior refinamento na elaboração da composição da argamassa, possível ajustando os níveis do retardador, do superplastificante e da água de modo que o parâmetro de Buildability da argamassa suporte o peso dos *layers* subjacentes.

De qualquer maneira, o uso do pó de mármore como substituto parcial de cimento para a impressão 3D em design de um produto é possível, benéfico e mais sustentável. Desta forma, o uso futuro desta tipologia de material e tecnologia de fabrico impulsionará as indústrias que usam o mármore como material principal nas suas atividades comerciais, no caso da indústria do mobiliário e arquitetura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O enquadramento teórico desenvolvido no Capítulo 2 - Estado da Arte permitiu concluir que os desperdícios originados da indústria da construção no qual o mármore está inserido representaram em 2020 60.9% da produção total de resíduos na UE (*Statistics Explained - Waste Statistics*, 2020). O subcapítulo da economia circular (2.1) serviu para entender como os princípios e estratégias da economia circular aliados ao design poderiam originar novas soluções quando aplicados.

Segundo (Singh et al., 2017) a aplicação do outro material constituinte numa composição de argamassa reduz a quantidade de resíduos que são despejados nos aterros, como também reduz o consumo de outras matérias-primas naturais como por exemplo o cimento ou areia. Para usar a argamassa num produto de adorno seria preciso descobrir que tipo de tecnologia era mais adequada para o propósito, deste modo, o estudo da impressão 3D como tecnologia de produção de argamassas binárias onde a substituição parcial do cimento por resíduos como o pó de mármore é assinalada como benéfica quando se trata das características mecânicas e reológicas para uma argamassa de impressão.

No plano experimental foi concluído que a substituição parcial do cimento pelo pó de mármore se provou fidedigno, representando boas características mecânicas e de impressão. Desta forma, determinou-se que a argamassa com melhor potencial de impressão era a argamassa GMP20%, devido a boa impressão e resistências mecânicas mediante a percentagem de pó de mármore utilizado.

O vaso e a mesa de centro desenvolvidos no Capítulo 4 validaram os objetivos desta dissertação, reciclar o resíduo de mármore através da transformação em pó, integrar esse pó de mármore numa argamassa cimentícia reduzindo o consumo de cimento e capaz de ser utilizada em contextos de 3DCP para

aplicações em design de produto. Sendo assim, demonstra-se a aplicabilidade de substituir o cimento por resíduos de mármore limitando assim o desperdício, o impacto nestas indústrias e impulsionamento da utilização da matéria-prima mármore integralmente. Este estudo colabora na transição de uma produção linear na indústria do mármore para uma mais circular, sustentável e mais rentável devido ao aproveitamento do material impulsionando a transição para uma economia circular.

Infelizmente, a percentagem de retardador usada para o desenvolvimento da mesa de centro impediu que a argamassa mantivesse a estabilidade dimensional exata para a realização perfeita da mesa de centro levando-a a imprimir 8 layers da peça alterando a largura de 400mm para 160mm. Desta forma este estudo abre asas para a continuação desta investigação como exposto no subcapítulo

5.2 Limitações e Desenvolvimentos Futuros

Independentemente da informação adquirida ao longo do estudo da temática, resta ainda muita exploração, estudo e investigação a se fazer, nomeadamente, testes de composições analisando dosagens de incorporação de pó de mármore superiores a 50% de substituição de cimento, reduzindo assim a quantidade de cimento e consequentemente custo e emissões de CO₂.

O projeto apesar de apresentar resultados satisfatórios quanto à impressão 3D da argamassa desenvolvida e à análise das composições da mesma, deparou-se com algumas limitações, principalmente na quantidade de resíduo de mármore que se trouxe da MAAMI, a falta de resíduo transformado em pó impediu a realização de uma segunda tentativa de impressão da mesa de centro, visto que, se fossemos adquirir uma segunda vez o resíduo seríamos obrigados a fazer um novo tratamento do resíduo em laboratório e uma reanálise dos elementos maiores do mármore forçando assim uma segunda reavaliação e possível modificação das propriedades do material.

Os possíveis desenvolvimentos futuros devem sempre ter em foco e consideração o motivo do projeto, recuperar, reutilizar e reciclar a matéria-prima (mármore) visando o desenvolvimento sustentável da indústria do mármore e de outras possíveis subindústrias dentro das atividades económicas da construção, da exploração mineira e da extração de minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICA

- 3DCP Group - The technology.* (2023). Retrieved 26 August 2023, from <https://3dcp.dk/the-technology>
- 3D-printed Homes in Nacajuca, Mexico with New Story – ICON.* (n.d.). Retrieved 26 August 2023, from <https://www.iconbuild.com/projects/3d-printed-homes-in-nacajuca-mexico-with-new-story>
- Ahmed, G. H. (2023). A review of ‘3D concrete printing’: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, 66, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105863>
- Aidico, Aitemin, Cevalor, & Imm Carrara. (2012, March 30). *Guideline of possible application of slurries in industries demanding micronized materials and valor by Recyslurry Project - Issuu.* https://issuu.com/recyslurry/docs/deliverable_2_1
- Aukour, F. J. (2009). Incorporation of Marble Sludge in Industrial Building Eco-blocks or Cement Bricks Formulation. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(1), 2009–2058.
- Ayres, R. (1994). The Greening of Industrial Ecosystems. In *The Greening of Industrial Ecosystems*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2129>
- Bakker, C., & Hollander, den M. (2013). *Six design strategies for longer lasting products in circular economy.* <http://www.theguardian.com/sustainable>
- Bdour, A., & Al-Juhani, M. (2011, December). *Utilization of Waste Marble Powder in Cement Industry - A. N. Bdour and M. S. Al-Juhani.* <https://www.eco-web.com/edi/111216.html>
- Benjeddou, O., Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Soussi, C., Khadimallah, M. A., Alabduljabbar, H., & Tahir, M. M. (2020). Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar.

- Journal of Building Engineering*, 32.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101642>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320.
<https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.006>
- Central Pollution Control Board Zonal Office (Central) Bhopal. (2012). *Disposal Options of Marble Slurry In Rajasthan*.
- Dada, H., Belaidi, A. S. E., Soualhi, H., Kadri, E.-H., & Benabed, B. (2021). *Influence of temperature on the rheological behaviour of eco-mortar with binary and ternary cementitious blends of natural pozzolana and marble powder*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.019>
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S. J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T. H. W., Mortara, L., Reed-Tsochas, F. P., & Rowley, J. (2017). Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 115, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>
- Dey, D., Srinivas, D., Panda, B., Suraneni, P., & Sitharam, T. G. (2022). Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130749.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749>

- Ekins, P., Domenech, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N., & Lotti, L. (2019). *The Circular Economy: What, Why, How and Where*.
- Ellen Macarthur Foundation. (n.d.-a). *Circular economy principle: Circulate products and materials*. Retrieved 20 April 2023, from <https://ellenmacarthurfoundation.org/pt/circular-produtos-e-materiais>
- Ellen Macarthur Foundation. (n.d.-b). *Circular economy principles: Eliminate waste and pollution*. Retrieved 18 April 2023, from <https://ellenmacarthurfoundation.org/eliminate-waste-and-pollution>
- Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy . 1*. <https://emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf>
- Ellen Macarthur Foundation, E. (2015). *Towards a circular economy Business rationale for an accelerated transition*. 0–20.
- Fugiel, A., Burchart-Korol, D., Czaplicka-Kolarz, K., & Smoliński, A. (2017). Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries. *Journal of Cleaner Production*, 143, 159–168. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.136>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.09.007>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition*.

- Harbouz, I., Roziere, E., Yahia, A., & Loukili, A. (2022). *Printability assessment of cement-based materials based on rheology, hydration kinetics, and viscoelastic properties*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126810>
- Kawalkar, R., Kumar Dubey, H., & Lokhande, S. P. (n.d.). *A review for advancements in standardization for additive manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.333>
- Kore, S. D., & Vyas, A. K. (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 85–92. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2016.01.002>
- Luiz Mattos Nascimento, D., Alencastro, V., Luiz Gonçalves Quelhas, O., Goyannes Gusmão Caiado, R., Arturo Garza-Reyes, J., Rocha-Lona Instituto Politécnico Nacional, L., Santo Tomás, E., City, M., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607–627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>
- Marceau, M. L., Nisbet, M. A., & Vangeem, M. G. (2007). *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things* (Vol. 1).
- Mestre, A., & Cooper, T. (2017). Circular product design. A multiple loops life cycle design approach for the circular economy. *Design Journal*, 20, S1620–S1635. <https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352686>
- Organic House / Javier Senosiain | ArchDaily*. (n.d.). Retrieved 9 July 2023, from <https://www.archdaily.com/909133/organic-house-javier-senosiain>
- Peck, D. (2018, April 18). *1.2 Principles of the Circular Economy | 1. What is the Circular Economy? | Circular Economy: An Introduction | edX*. <https://learning.edx.org/course/course-v1:Delftx+CircularX+1T2018/block-v1:Delftx+CircularX+1T2018+type@sequential+block@e82fd11d68b24782a>

- 0348d9e58585abd/block-
v1:Delftx+CircularX+1T2018+type@vertical+block@97bee04bacd446f88e2
61ad0420a3b60
- Pulycort, & David. (2019, May 9). *Marble porcessing: How is manufacturing process of marble? - Pulycort*. <https://www.pulycort.com/en/marbles/marble-processing.html>
- SC Johnson's Frank Lloyd Wright Buildings: You're Always Welcome for Tours. (n.d.). Retrieved 27 July 2023, from <https://www.scjohnson.com/en/interacting-with-sc-johnson/tours-and-architecture/tours-and-films/youre-always-welcome-for-tours>
- Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E.-H., & Bennacer, R. (2010). *Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS)*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065>
- Silva, A. (2016). *Resíduos de Mármore e Resíduos de Construção e Demolição no Cimento*. <http://www.fe.up.pt>
- Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Singh Sangwan, K., & Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13, 87–95. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.07.009>
- Souza, E. (2021, May 4). *Alvar Aalto and the Use of Timber: From Stools to Ceilings and Structures* | ArchDaily. <https://www.archdaily.com/960708/alvar-aalto-and-the-use-of-timber-from-stools-to-ceilings-and-structures>
- Statistics Explained - Waste Statistics*. (2020). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics&action=statexp-seat&lang=pt#Produ.C3.A7.C3.A3o_total_de_res.C3.ADduos

- Sumter, D., de Koning, J., Bakker, C., & Balkenende, R. (2021). Key Competencies for Design in a Circular Economy: Exploring Gaps in Design Knowledge and Skills for a Circular Economy. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 776, 13(2), 776. <https://doi.org/10.3390/SU13020776>
- Syed, K. I., Kabeer, A., & Kumar Vyas, A. (2018). *Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>
- Tea trolley, designed by Alvar Aalto for Artek — Modernity*. (n.d.). Retrieved 8 July 2023, from <https://www.modernity.se/tea-trolley-designed-by-alvar-aalto-for-artek/>
- Tukker, A. (2018). *2.5 Business Models for a Circular Economy | 2. Business Value in a Circular Economy | Circular Economy: An Introduction | edX*. <https://learning.edx.org/course/course-v1:Delftx+CircularX+1T2018/block-v1:Delftx+CircularX+1T2018+type@sequential+block@e6812c31d98744ce8af895a7fd945a29/block-v1:Delftx+CircularX+1T2018+type@vertical+block@67f9440a15e442d298a18334f5df0373>
- van Dam, K., Simeone, L., Keskin, D., Baldassarre, B., Niero, M., & Morelli, N. (2020). Circular economy in industrial design research: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su122410279>
- Virtual Tours of SC Johnson's Global Headquarters*. (n.d.). Retrieved 27 July 2023, from <https://www.scjohnson.com/en/interacting-with-sc-johnson/tours-and-architecture/virtual-tours>
- Weng, Y., Li, M., Tan, M. J., & Qian, S. (2018). *Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>
- What is the linear economy?* (n.d.). Retrieved 14 April 2023, from <https://ellenmacarthurfoundation.org/what-is-the-linear-economy>

ANEXOS

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio à flexão

Provete	Massa (g)	Data de Fabrico	Idade (dias)	Carga de Rotura F_r (kN)	Resistência à Flexão R_f (MPa)	Resistência à Flexão Média (MPa)
GMP0-1-1	554,6	22/03/2022	14	3	7	8,5
GMP0-1-2	557,1			4	9,4	
GMP0-1-3	548,9			3,9	9,1	
GMP0-2P-1	583,8	22/03/2022	14	4,2	9,8	9,7
GMP0-2P-2	594,5			4,4	10,3	
GMP0-2P-3	599,2			3,8	8,9	
GMP5-1	573,9	22/03/2022	14	4,2	9,8	10
GMP5-2	571,4			4,2	9,8	
GMP5-3	577,1			4,4	10,3	
GMP10-1-1	551,1	22/03/2022	14	3,2	7,5	8,3
GMP10-1-2	555,1			3,9	9,1	
GMP10-1-3	549			3,5	8,2	
GMP10-2-1	605,9	22/03/2022	14	3,9	9,1	10,1
GMP10-2-2	607,6			4,7	11	
GMP10-2-3	589,7			4,4	10,3	
GMP10P-1	570,2	23/03/2022	14	4,3	10,1	10,1
GMP10P-2	581,4			4,4	10,3	
GMP10P-3	564,2			4,2	9,8	
GMP20-1	580,3	23/03/2022	14	3,6	8,4	8,7
GMP20-2	563,3			3,8	8,9	
GMP20-3	552,4			3,8	8,9	
GMP20P-1	563,7	23/03/2022	14	4	9,4	8,9
GMP20P-2	553,4			3,4	8	
GMP20P-3	560,6			4	9,4	
GMP50-1	576,5	23/03/2022	14	3,8	8,9	8,6
GMP50-2	580,5			3,5	8,2	
GMP50-3	577,5			3,7	8,7	

Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio à compressão

Provete	Data de Fabrico	Idade (dias)	Carga de Rotura Fc (kN)		Resistência à Compressão R _f (MPa)		Resistência à Compressão Média R _c (MPa)	Conformidade do Cimento	
GMP0-1-1	22/03/2022	14	125,7	136,3	78,6	85,2	81,1	5,1	4,7
GMP0-1-2			128,5	135,6	80,3	84,8			
GMP0-1-3			128,6	123,7	80,4	77,3			
GMP0-2P-1	22/03/2022	14	162,1	158,4	101,3	99	97,3	4,1	4,7
GMP0-2P-2			156,2	148,3	97,6	92,7			
GMP0-2P-3			152,9	156,2	95,6	97,6			
GMP5-1	22/03/2022	14	151,8	149,5	94,9	93,4	92,7	3,5	5,3
GMP5-2			151,5	140,5	94,7	87,8			
GMP5-3			153,5	143	95,9	89,4			
GMP10-1-1	22/03/2022	14	105,2	107	65,8	66,9	66,2	1,4	2,1
GMP10-1-2			103,7	107,4	64,8	67,1			
GMP10-1-3			107,4	104,7	67,1	65,4			
GMP10-2-1	22/03/2022	14	138,7	141,8	86,7	88,6	87,5	1,9	3,3
GMP10-2-2			139,5	135,3	87,2	84,6			
GMP10-2-3			142	142,7	88,8	89,2			
GMP10P-1	23/03/2022	14	143,1	141,4	89,4	88,4	88,9	3	3,1
GMP10P-2			141,8	142,7	88,6	89,2			
GMP10P-3			146,6	137,7	91,6	86,1			
GMP20-1	23/03/2022	14	124,4	121,4	77,8	75,9	76,4	3,4	4,5
GMP20-2			126,4	122	79	76,3			
GMP20-3			122,1	116,8	76,3	73			
GMP20P-1	23/03/2022	14	118,4	117,1	74	73,2	73,6	2,3	2
GMP20P-2			118	120,5	73,8	75,3			
GMP20P-3			117	115,3	73,1	72,1			
GMP50-1	23/03/2022	14	94,2	94,7	58,9	59,2	58,7	2,2	2,2
GMP50-2			89,6	94,8	56	59,3			
GMP50-3			94	96	58,8	60			

MAAMI - RELATÓRIO ENTREVISTA

Questões abordadas na entrevista:

1. Local de extração da matéria-prima?

Sérgio Costa - “.... Os locais de extração da matéria-prima são vários, alguns por motivos de negócio nós não sabemos exatamente de onde é que eles são ok? Há sítios que nós compramos muito perto das pedreiras digamos assim e sabemos ou dizem, há outros que por exemplo, uma pedra que vem do Irão ou da China ou do Chile ou vão ter a Itália onde têm os grandes depósitos de mármore e nós compramos em Itália. A origem das pedras não é muito conhecida porque quem as vende não as quer dizer de onde elas são para evitar aquela coisa”

Ana Mafalda Matos - “Não é nacional então?”

Sérgio Costa - “Muitas não, nós usamos pedras nacionais sem ser nacionais”

Bárbara Rangel - “Não tem ideia de percentagens?”

Sérgio Costa - “20% Nacionais neste momento...”

Pedro Pêgo - “Então as pedras internacionais vocês compram em Itália e os 20% que são comprados em Portugal onde compram?”

Sérgio Costa - “Na maioria ou é do Alentejo ou na zona de Fátima e Porto Mós”

1.1 É sempre da mesma região?

Sérgio Costa - “Não”

2. Pó de mármore é resíduo ou subproduto?

Sérgio Costa - “Não”

2.1 É valorizado ou reciclado de alguma forma?

Sérgio Costa - “A lama não valorizamos, é aterrada... num aterro próprio... e pagamos por isso”

Sérgio Costa - “Um dos senhores que faz o transporte, vocês viram o contentor lá fora cheio de bocados maiores de pedra? Isso é uma empresa também que nós alugamos um contentor e eles vem cá, carregam e nós pagamos um aluguer todos os meses de um valor qualquer. Eles vem cá e levam. O pó eles estavam-me a dizer que chegam lá e que tinham de abrir os sacos e pegam e aproveitam para cobrir outros resíduos, acho que não fazem tratamento nenhum.”

Sérgio Costa - “As pedras estamos a desenvolver alguns produtos, aqueles bocados maiores e tudo mais, tentar cortar outra vez e desenvolver uns pequenos produtos, sei lá, porta canetas, mesas mesmo... as vezes vem pessoas buscar os pedaços para fazer o chão em casa...”

3. Quantidade produzida mensalmente?

Sérgio Costa - “...cada saco leva cerca de 800 quilos... enchemos 6 sacos ao mês...” = 4 toneladas +/-

4. Caracterização do resíduo (física/química)

Sérgio Costa - “Não, não temos”

5. O resíduo tem algum aditivo?

Sérgio Costa - "...floculante..."

6. Há outros tipos de resíduos desperdiçados?

Sérgio Costa - "Não..."

7. Dada a vossa experiência, já utilizam o pó do mármore para eventuais correções de peças?

Sérgio Costa - "Às vezes, mas pouquinho..."

7.1 Se sim, com que composições?

Sérgio Costa - "Não, que dizer é melhor nem consideram, meta não..."

8. Se sim, que tipos de produtos acham interessantes produzir de acordo com o que a empresa faz e o que o mercado procura?

Sérgio Costa - "Para imprimir?"

Pedro Pêgo - "Sim"

Sérgio Costa - "...falei-vos dos lavatórios..."

9. Consideram possível a utilização da marmorite?

Sérgio Costa - "Sim, por exemplo nós estamos em contacto com uma empresa sueca para ter uma argamassa que é revestimento que é para pintarmos os móveis..."

10. Aceitam revelar o nome da empresa e se é do interesse da mesma?

Sérgio Costa - “Podem claro, acho que até é bom para a empresa...”

