

IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

ESTUDO COMPARATIVO COM OS MÉTODOS CONVENCIONAIS

CLEYDE LETÍCIA CASIMIRO MABOTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Orientador: Prof. Doutora Bárbara Rangel Carvalho

DEZEMBRO DE 2023

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2021/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

T: +351 22 508 1901

Fax: +351 22 508 14 40

✉ mprince@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2021/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

- Aos meus pais

"O futuro da construção está sendo construído com camadas de inovação: um projeto sólido, uma base de conhecimento robusta e o extrusar contínuo da criatividade."

- Autor Desconhecido

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa não apenas a fase final do curso que frequento, mas de um percurso escolar de quase 20 anos. Desta forma, tenho necessariamente de agradecer à minha família, e em particular aos meus pais, por todas as oportunidades proporcionadas, mas também pelas exigências, incentivos e tolerância demonstrados ao longo de esta trajetória.

Por fim, tenho também de agradecer ao Arquiteta Bárbara Rangel pela disponibilidade imediata demonstrada quando solicitei ajuda para a escolha do tema o para esta dissertação, bem como ao longo de todo o seu desenvolvimento.

As minhas colegas e amigas da FEUP, em especial, a Rayanna, Natália, Hemilly, Tássia e Zainune por todas as horas de estudo, por todo o companheirismo que percorreram comigo durante esses dois anos de mestrado, solidariedade e amizade que sempre demonstraram, por todo o apoio nas horas menos boas superado por estar distante da família e amigo, sobretudo, por tornarem todo o meu percurso académico inesquecível.

RESUMO

A impressão 3D na construção é uma tecnologia emergente cujo objetivo é produzir estruturas de edifícios de forma rápida, eficiente e com menos desperdício. O uso da impressão 3D na indústria é uma das fortes tendências da revolução industrial que está em andamento – a Indústria 4.0.

É uma ferramenta importante, até mesmo essencial, na transformação do cenário da construção. A impressão 3D permite reduzir custos e ajuda a diminuir o tempo gasto na produção, além de minimizar significativamente possíveis falhas no processo de construção, uma vez que as falhas poderão ser eliminadas na fase de projeto, por isso, ocasiona menos desperdícios.

Por isso, o estudo conduzido nesta dissertação concentra-se nos principais progressos relacionados à impressão 3D na construção, abrangendo o uso de diversos materiais como concreto, argamassa, metal, polímeros e argamassas à base de terra. Além disso, também explora os recentes avanços em robótica e automação que têm contribuído para aumentar a eficiência e a precisão da construção em larga escala. Tais avanços permitiram a criação de impressoras de grande formato capazes de produzir estruturas completas de edifícios com vários pisos.

Por outro lado, para que isso seja possível é indispensável uma atualização dos currículos dos engenheiros civis e a integração da modelação digital em 3D (BIM), visto que esta é uma das ferramentas-chave e exaustivas que a 3DPC requer.

Adicionalmente, para a presente dissertação, para avaliar a viabilidade de desempenho da 3DPC desenvolveu-se um caso de estudo com objetivo de fazer a comparação da construção casa usando o auxílio tecnológico da impressão 3D e da construção corrente, os critérios dessa comparação focaram se nos custos, qualidade de materiais e tarefas.

Por fim, a presente dissertação conclui que esta tecnologia inovadora irá certamente proporcionar fortes mudanças na AEC, no momento é difícil avaliar exatamente o impacto que a impressão 3D na IC, sabe-se vagamente que há potencial económico no uso da 3DPC, entretanto com estudo de caso desta tese resultou numa economia significativa de aproximadamente 34.55% relativamente ao custo da construção convencional. Isso demonstra o potencial da construção 3D como uma alternativa viável, capaz de revolucionar o sector, tornando mais acessível e sustentável.

PALAVRAS - CHAVE: IMPRESSÃO 3D; CONSTRUÇÃO; IMPRESSORAS DE GRANDE FORMATO; CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL; ESTUDO COMPARATIVO.

ABSTRACT

3D printing in construction is an emerging technology aimed at producing building structures quickly, efficiently, and with minimal waste. It is one of the strong trends in the ongoing industrial revolution, Industry 4.0. This technology represents a crucial and even essential tool in transforming the construction landscape. By utilizing 3D printing, costs can be reduced, production time can be shortened, and potential construction errors can be significantly minimized. Identifying and addressing faults in the design phase allows for less waste.

For this reason, the study conducted within this dissertation focuses on the main advances in 3D printing construction, including the use of materials such as concrete, mortar, metal, polymers, and earth-based mortar. Additionally, it explores new developments in robotics and automation that increase the efficiency and precision of large-scale construction. This has become possible thanks to large-format printers capable of producing entire building structures with multiple floors.

However, achieving these goals requires updating the curricula for civil engineers and integrating 3D digital modeling (BIM). The latter is an indispensable and exhaustive tool that 3D printing construction demands.

Furthermore, this dissertation presents a case study aiming to assess the feasibility and performance of 3D printing construction. The study's objective is to compare the construction of a house using 3D printing technology against conventional construction methods, focusing on criteria such as costs, material quality, and tasks involved.

In conclusion, this innovative technology undoubtedly promises significant changes in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry. While it remains challenging to precisely evaluate the impact of 3D printing in construction, there is vague awareness of its economic potential. Nevertheless, the case study conducted as part of this thesis resulted in a substantial cost savings of approximately 35% compared to conventional construction. This demonstration of 3D construction's potential as a viable alternative capable of revolutionizing the sector, making it more accessible and sustainable.

KEYWORDS: 3D PRINTING; CONSTRUCTION; LARGE-FORMAT PRINTERS; MARKET STUDY.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2 MOTIVAÇÃO.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 METODOLOGIA.....	4
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. DEFINIÇÃO DE IMPRESSÃO 3D	5
2.3. CATEGORIAS DE PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D.....	6
2.4. APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D EM VÁRIOS TIPOS DE INDÚSTRIA	5
3. CASO DE ESTUDO I – 3DP NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.....	13
3.1. INTRODUÇÃO.....	13
3.2. CATEGORIAS DE IMPRESSÃO 3D NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	14
3.2.1 COUNTOR CRAFTING	14
3.2.2 CONCRETE PRINTING.....	16
3.2.3 D-SHAPE	16
3.2. APLICAÇÃO DE IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	18
3.4 IMPRESSORAS DE GRANDE FORMATO.....	23
3.4.1 BRAÇO ROBÓTICO FIXO/MÓVEL	24
3.4.2 SISTEMA DE PÓRTICO (GANTRY)	24
3.4.3 GRUPO DE ROBÔS MÓVEIS (MINI-BUILDERS)	26
3.4.4 MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO POR IMPRESSÃO 3D.....	28
3.5 EXEMPLOS DE PROJETO FEITOS À BASE DE 3DP.....	36
3.5.1 INTRODUÇÃO.....	36
3.5.1.1 METODOLOGIA/PLANO EXPERIMENTAL.....	36
3.5.2 THE BOD – COBOD	37
3.5.3 GAIA HOUSE - WASP	41
3.5.4 ROBUST VILLA – CYBE CONSTRUCTION	44

3.5.5 THE HOUSE - APIS COR.....	47
3.5.6 HOUSE 1.0 – GRUPO 3DPC –COBOD.....	50
4. COMPARATIVO ENTRE A CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL E A 3DPC.....	54
4.1 INTRODUÇÃO.....	54
4.1.1 PROJETO DE HABITAÇÃO UNIFAMILIAR (DADOS DE PROJETO)	55
4.1.2 TABELA DE QUANTIDADES.....	55
4.1.3 CUSTOS E RENDIMENTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CORRENTE (AE).....	56
4.1.4 CUSTO E RENDIMENTOS DE MÃO-DE-OBRA E EQUIPAMENTOS (AE)	56
4.2 ANÁLISE DA CONSTRUÇÃO 3DPC.....	62
4.2.1 INTRODUÇÃO.....	62
4.2.2 METODOLOGIA	62
4.2.3 ANÁLISE DE CUSTOS – IMPRESSÃO 3D	62
4.2.4 ANÁLISE DA DURAÇÃO DA CONSTRUÇÃO - IMPRESSÃO 3D.....	65
5.DISSCUSSÃO DE RESULTADOS.....	67
5.1 COMPARAÇÃO NO PONTO DE VISTA DA DURAÇÃO DAS TECNOLOGIAS CC E 3DPC	67
5.2 COMPARAÇÃO NO PONTO DE VISTA DE MÃO DE OBRA	67
5.3 COMPARAÇÃO NO PONTO DE DURAÇÃO	68
5.4 COMPARAÇÃO NO PONTO DE CUSTOS.....	69
6.CONCLUSÕES.....	71
6.1 CONCLUSÕES FINAIS	71
6.1.1 COMPARATIVO ENTRE A TECNOLOGIA DE 3DPC E A CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL.....	72
6.1.2 DESENVOLVIMENTO FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO.....	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXO 1.....	82
ANEXO 2.....	86
ANEXO 3.....	88
ANEXO 4	90

ÍNDICE GERAL

Imagem 1 – Diferentes indústrias que aplicam na 3DP [9]	7
Imagem 2- Sete categorias de AM [14] e [13]	9
Imagem 3 - Imagem ilustrativa da tecnologia de impressão Material Jetting [14]	9
Imagem 4 - Ilustração da tecnologia de impressão DED [14]	9
Imagem 5 - Imagem ilustrativa da tecnologia de impressão Material Extrusion [14]	10
Imagem 6 - Ilustração da tecnologia de impressão powder bed fusion [14]	10
Imagem 7 - Ilustração da tecnologia de laminação de folhas [14]	11
Imagem 8 - Ilustração da tecnologia de Fotopolimerização em Cuba [14]	11
Imagem 9 -Principais áreas de aplicação da Impressão 3D e atributos preferenciais, estudo desenvolvido pela Deloitte [5]	13
Imagem 10 - Evolução do 3DPC: em empresas, universidades e alguns dos marcos mais importantes [20]	16
Imagem 11 - Ilustração de um sistema de Contour Crafting em ação [20].	17
Imagem 12 - Assemblagem de revestimento cerâmico em paredes impressas [21]	17
Imagem 13- Sistema de impressão CP [20]	18
Imagem 14 - The Ferreri House construído usando o método D-Shape [23]	18
Imagem 15 - Diagrama de Venn das 3 técnicas de impressão 3D [22].	19
Imagem 16 - Mobiliários impressos em 3D [25].	20
Imagem 17 - Renderização de um nó de fachada e um protótipo de nó de alumínio em tamanho real [26].	21
Imagem 18 - Peças produzidas com recursos de impressão destinadas a reabilitação de um edifício antigo [9].	21
Imagem 19 - Processo de impressão de estrutura de isolamento térmico em espuma cerâmica [29].	22
Imagem 20 - Transpor um empreendimento AI SmartHome construído com recurso da 3DPC [30]	22
Imagem 21 - Parte de parede impressa com escada embebida fabricada pela empresa IAAC e WASP [31] e [32]	23
Imagem 22 - Colocação das fundações no local de obra e comparação com sapata usando o método convencional [33]	24
Imagem 23 – Coral Impresso [43].	24
Imagem 24 – Coral na integrado na vida marinha [43].	24
Imagem 25- Imagem ilustrativa da impressão in situ [20].	25
Imagem 26 - Esquema de configuração da impressão de grande formato [14].	25
Imagem 27 - Braço robótico móvel-CyBe [38].	26
Imagem 28 - Braço robótico fixo-CyBe [38].	26
Imagem 29 - Sistema de pórtico (gantry) da empresa COBOD [40].	27
Imagem 30 - Impressora Delta Big WASP [40].	27
Imagem 31 - Esquema de funcionamento das impressoras tipo mini – builders desenvolvida pela IAAC [14].	29
Imagem 32 - Propriedades e equipamentos necessários para 3DP com extrusão de material [44]	31
Imagem 33 – CyBe Mortar [50].	32
Imagem 34 - Comparativo da pegada de Co2 entre argamassas de D-Fab e outros tipos de argamassas [55].	33
Imagem 35 - Abordagens seguidas pela literatura no desenvolvimento de materiais 3DP mais sustentáveis [48].	33

Imagem 36 – Simulação gráfica da ponte projetada pela empresa MX3D [57].....	34
Imagem 37 – Ponte impressa em exposição [53].	34
Imagem 38 - Primeiro projeto da Start-up DUS Architects, denominada por Casa Urbana com a dimensão de 8 m ² por 35 m ³ [59].	35
Imagem 39 - The Bod [64].....	38
Imagem 40 - Execução da estrutura [64].....	38
Imagem 41 - Sistema de pórtico (gantry) da empresa COBOD [64]	39
Imagem 42 - área de atuação das impressoras [61].....	39
Imagem 43 – Especificações da Impressora [66].....	40
Imagem 44 - Planta R/C	81
Imagem 45 - Planta Piso 1.....	82
Imagem 46 - Planta da cobertura.....	83
Imagem 47 - Corte 1	87
Imagem 48 - Corte 2	87
Imagem 49 - Alçado Principal.....	89
Imagem 50 - Alçado posterior.....	89

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e Limitações dos processos de produção com tecnologia de Fabrico Aditivo.....	12
Quadro 2 - Principais pontos dos métodos de impressão empregues na construção civil.....	19
Quadro 3 - Comparativo de tipos de impressoras [35],[34].	29
Quadro 4 - Mapeamento das entidades fabricantes de impressoras 3DP no mundo [47] e [46].	30
Quadro 5 - Resumo das principais propriedades dos materiais impressos em 3D apresentados anteriormente;	36
Quadro 6 - Resumo das dos empreendimentos apresentados anteriormente.....	52
Quadro 7 - Quantidades referentes aos paramentos à serem construídos.	54
Quadro 8 - Custo de material para fundações e estrutura;.....	54
Quadro 9 - Custo de material para execução de alvenarias;.....	55
Quadro 10 - Custo de material para execução de rebocos;	56
Quadro 11 - Custo e rendimento de mão de obra para execução de alvenarias cofragem para fundações;	56
Quadro 12 - Custo e rendimento de mão de obra e equipamentos para execução das armaduras para fundações;.....	57
Quadro 13 - Custo e rendimento de mão de obra para betonagem para fundações;	57
Quadro 14 - Custo e rendimento de mão de obra para betonagem dos pilares;	57
Quadro 15 - Rendimento de mão de obra para elaboração de betonagem da cobertura;	58
Quadro 16 - Custo e rendimento de mão de obra para elaboração de alvenarias;.....	58
Quadro 17 - Custo e rendimento de mão de obra para execução de rebocos;.....	59
Quadro 18 -Custo total da moradia da construção convencional;.....	59
Quadro 19 - Custo por metro quadrado dos elementos estruturais para habitação da Robust Villa e Casa 1.0	61
Quadro 20 - Custos diretos de materiais de construção utilizando os indicadores da Robust Villa;.....	61
Quadro 21 - Custo total da moradia em impressão por 3DPC com indicadores da Robust Villa.	61
Quadro 22 – Custo total da Construção por 3DPC	62
Quadro 23 – Comparação do ponto de vista de duração da construção entre as duas tecnologias.	66

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

2D – Bidimensional;

3D – Tridimensional;

3DP – Three Dimensional Print ou Three Dimensional Printing (Impressão a três dimensões);

3DPC – Three Dimensional Print ou Three Dimensional Printing Construction (Construção por Impressão à três dimensões);

AM – Additive Manufacturing – em Português Fabricação Aditiva;

BIM – Building Information Modeling.

ISO/ASTM – International Organization Standardization.

BJ – Binder Jetting – Projeção de Aglutinante;

CAD – Computer Aided Design – Projeto Assistido por Computador;

FA – Fabrico Aditivo;

RP – Protipagem rápida, em inglês (*Rapid Prototyping*);

CC – *Contour Crafting*.

WASP – *World's Advanced Saving Program*.

AEC - Arquitetura, Engenharia, Construção;

STL – Estereolitografia, em inglês (*Stereolithography*);

FA – Fabricação Aditiva;

IC – Indústria da Construção, em inglês CI (*Construction Industry*);

FDM – Modelação por Deposição de Material Fundido, em inglês (*Fused Deposition Modeling*);

PC – Portland Cement

SLA – Estereolitografia, em inglês (*Stereolithography*);

Kg – Quilogramas;

PME – Pequenas e médias empresas;

€– Euro;

R/C – Rés do chão;

MDO – Mão de Obra;

Qtd – Quantidade;

AE - Alvenaria estrutural;

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O mundo da impressão 3D lembra os primórdios da introdução dos computadores pessoais ao público em geral. Naquela época, as possibilidades dessa tecnologia emergente eram ilimitadas, mas ninguém poderia antecipar seu impacto profundo na vida quotidiana global. Da mesma forma, a recente exploração da impressão 3D na construção está a revolucionar a indústria, oferecendo soluções inovadoras para lidar com a industrialização[1].

A impressão 3D na construção, também conhecida como 3DPC, possui um grande potencial para avanços significativos nos prazos de construção, redução de custos e melhoria das medidas de segurança, ao reduzir a dependência de mão de obra manual. Atualmente, o panorama da impressão 3D na construção está evoluindo rapidamente, à medida que vários métodos e tecnologias são experimentados e desenvolvidos. O desafio para a indústria da construção reside em integrar a 3DPC com os processos de construção convencionais que estão em uso há décadas. Essa integração requer uma abordagem de tentativa e erro que pode levar anos para estabelecer métodos de construção padronizados com impressoras 3D de grande porte [4].

O objetivo principal é investigar as diversas tecnologias de impressão 3D atualmente disponíveis no mercado e determinar de que maneira elas podem aprimorar as práticas construtivas vigentes. Ao obter uma compreensão aprofundada desses dois aspetos, os interessados estarão aptos a vislumbrar as implicações substanciais que a impressão 3D poderá acarretar para a indústria da construção.

Com base nos avanços mencionados, objetivo secundário desta pesquisa é examinar as tecnologias de impressão 3D empregues na indústria da construção e realizar uma análise comparativa com os métodos de construção convencionais. Isso será feito por meio de exemplos de projetos construídos utilizando essa abordagem tecnológica.

1.2 MOTIVAÇÃO

A construção civil é conhecida por ser uma das indústrias que mais geram desperdício de materiais, entretanto o uso da impressão 3D na construção permite abordagem mais sustentável, pois os projetos podem ser modelados digitalmente em 3D, permitindo a análise prévia e correção de possíveis falhas antes da execução física, com menos desperdício de materiais, contribui-se para a preservação do meio ambiente e para a redução do impacto ambiental causado pelas atividades de construção.

A aplicação da impressão 3D na construção abre portas para a inovação e a experimentação com novos materiais além dos tradicionais, materiais como polímeros, argamassa, gesso, metais e até materiais a base de terra, vem sendo desenvolvidos para atender a requisitos específicos de projetos de construção visto que a tecnologia 3DPC é capaz de imprimir estruturas complexas e personalizadas permitindo uma maior liberdade criativa para os arquitetos e engenheiros, proporcionando designs únicos e arrojados.

Face ao contexto social português tendo em conta ao mercado habitacional em expansão o turismo e ao alojamento local torna assim a impressão 3D bastante atrativa de antemão, sobretudo se for considerado o facto de ser uma alternativa mais económica, face aos métodos tradicionais de construção e de ser ecologicamente mais adequada, pois emite gases poluentes em menor quantidade.

Em geral, é essencial que a tecnologia seja economicamente atraente e ofereça vantagens distintas em relação a outras opções disponíveis. Portanto, torna-se crucial avaliar o alcance do impacto económico e social que a construção por impressão 3D pode gerar, especialmente no setor de construção de casas unifamiliares de pequeno-médio porte.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GERAIS

O propósito principal desta dissertação é analisar a viabilidade da aplicação da tecnologia de Impressão 3D na construção de pequenas moradias em Portugal, com o objetivo de fundamentar uma opinião sobre se a implementação em larga escala dessas habitações é uma oportunidade viável ou se é um conceito inviável.

1.4.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem alcançados são os seguintes:

- Apresentar uma análise das tendências globais do uso da tecnologia de impressão 3D na construção civil e refletir sobre a situação atual da sua implementação em Portugal.
- Desenvolver um protótipo de moradia em construção corrente em alvenaria estrutural considerado "comum" para uma família média Portuguesa.
- Realizar uma reflexão fundamentada sobre a questão econômica e do ponto de vista da duração de empreitadas: coletar e apresentar dados relevantes sobre a redução de custos proporcionada por essa tecnologia em comparação com as técnicas convencionais de construção.
- Concluir, com base em dados concretos resultantes das pesquisas efetuadas, se a introdução da tecnologia de impressão 3D na construção de moradias em Portugal é uma possibilidade atual que merece ser explorada, ou se, na realidade, trata-se de uma ideia que ainda não pode ser aplicada em larga escala.

Ao alcançar esses objetivos, esta dissertação pretende contribuir para o avanço do conhecimento sobre a viabilidade da Impressão 3D na construção de moradias em Portugal, tornando a informação acessível ao público geral e à comunidade acadêmica. Através da divulgação dos resultados obtidos e reflexões fundamentadas, busca-se estimular o debate em torno das inovações tecnológicas na indústria da construção civil, de forma a promover uma compreensão mais ampla sobre as potenciais melhorias nas condições habitacionais e a sustentabilidade desse setor no país.

Ao tornar as conclusões e descobertas compreensíveis e relevantes, espera-se que esta pesquisa possa inspirar um interesse crescente na adoção da tecnologia de Impressão 3D em Portugal, assim como suscitar discussões construtivas e informadas entre os especialistas do setor, acadêmicos, formuladores de políticas públicas e a sociedade em geral.

1.4 METODOLOGIA

- Natureza da pesquisa:

A metodologia adotada para esta pesquisa envolve uma abordagem mista, que combina elementos de pesquisa qualitativa e quantitativa. Essa abordagem visa proporcionar uma compreensão abrangente e aprofundada das diferenças entre construção convencional e construção por impressão 3D (3DPC).

Na pesquisa qualitativa, a equipe explorará os requisitos, processos e experiências relacionados à construção por impressão 3D e à construção convencional em todo o mundo.

Por outro lado, a abordagem quantitativa será empregue para a análise de dados durante a comparação entre construção convencional e construção por impressão 3D (3DPC). Isso envolverá a coleta de dados numéricos relacionados a métricas objetivas, como custos e tempo de construção.

A combinação dessas abordagens qualitativa e quantitativa é complementar, permitindo que a equipe obtenha uma compreensão mais profunda dos resultados da pesquisa quantitativa por meio da interpretação qualitativa.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho realizado no âmbito da presente dissertação foi dividido em sete capítulos. O primeiro consiste na Introdução ao tema abordado ao longo do estudo, que trata da aplicação da Impressão 3D na indústria em geral e a construção, incluindo seu enquadramento nos dias atuais e o emergente potencial para todos os setores industriais. As motivações que levaram à escolha desse tema, bem como os objetivos traçados para sua concretização, também foram descritos no capítulo introdutório.

O segundo capítulo constitui o *Estado da Arte* do tema escolhido, apresenta os principais conceitos e matérias relacionadas com a Impressão 3D, desde sua origem até seu estado atual. Além disso, discorre sobre a pesquisa realizada acerca das mais recentes aplicações dessa tecnologia no setor da construção, buscando compreender como e de que formas ela pode ser aplicada nessa especialidade da engenharia civil.

No terceiro capítulo, intitulado *"Caso de estudo - 3DP no Setor da Construção"*, descrevem-se e analisam-se todos os recursos tecnológicos disponíveis para a realização do estudo prático de 3DP na atual dissertação. Dessa forma, a escolha das aplicações a testar baseou-se nas capacidades da tecnologia atualmente disponível. Além disso, são descritos todos os materiais que podem ser aplicados na IC e por fim *"Exemplo de Empreendimentos Construídos à Base de 3DP"*, seleciona-se para uma análise seis projetos que foram desenvolvidos nos últimos cinco anos.

Neste capítulo detalham-se todas as etapas necessárias para a Impressão 3D nesses projetos, desde a fundação, materiais e números de técnicos envolvidos na empreitada até à sua impressão propriamente dita. Esse capítulo tem como finalidade auxiliar a comparação dos dois métodos. Ainda no caso de estudo no capítulo 4 é denominado *"Comparativo Entre a Construção Convencional e a 3DPC"*, onde descreve-se o processo de construção de uma habitação por construção corrente (alvenaria, um sistema popular e comumente usado em Portugal) e construção 3DPC. São apresentadas as etapas necessárias, desde a fundação até a cobertura, bem como a quantidade de mão-de-obra e os seus respetivos custos e a duração dos dois métodos de construção.

O quinto capítulo, designado por *"Discussão dos resultados"*, os resultados obtidos foram apresentados e analisados, qualitativa e quantitativamente, e foram apontadas as principais dificuldades que surgiram ao longo de todo o procedimento experimental.

Por fim, no último capítulo, intitulado *"Conclusões Finais"*, como o próprio nome indica, expõem-se as conclusões retiradas de toda a investigação e análise realizados ao longo do estudo de caso sobre a aplicabilidade da Impressão 3D na construção. Também são apresentadas algumas reflexões sobre possíveis desenvolvimentos futuros dessa tecnologia na sua relação com a engenharia civil.

2

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, apresenta-se uma análise abrangente sobre a 3DPC e a manufatura aditiva (AM), desde a sua origem até o estado atual das pesquisas, com foco nas aplicações mais recentes na construção. A estrutura deste capítulo é a seguinte:

1. Definição de Impressão 3D (seção 2.2): Nesta seção, concentramos nossa atenção na definição da impressão 3D (3DP) e da manufatura aditiva (AM). Além disso, exploramos o surgimento dessas tecnologias e suas características essenciais.

2. Categorias da Manufatura Aditiva (subcapítulo 2.3): No subcapítulo 2.3, analisamos as sete categorias distintas de fabricação aditiva, que são classificadas com base nos padrões de qualidade estabelecidos pela ISO (organização internacional de normalização).

3. Aplicações da impressão 3D (seção 2.4): Na seção 2.4, examinamos as principais áreas de aplicação da 3DP e os atributos preferenciais que diferem entre diversas indústrias.

2.2. DEFINIÇÃO DE IMPRESSÃO 3D

A *Impressão 3D*, ou *manufatura aditiva - MA (Additive manufacturing-AM)* como também é conhecida, refere-se a um corpo de tecnologias que começaram a ser desenvolvidas na década de 1980. A AM possui várias tecnologias de produção existentes, estas diferem-se tanto em abordagem quanto ao material, porém, elas compartilham características únicas de construção de um objeto fabricando-as em camada por camada por adição de material [2].

Os especialistas, de diversas áreas industriais, descrevem o processo de AM como sendo uma solução prática para testar novos conceitos num determinado produto, realizar ensaios necessários, provar a sua viabilidade e obter o respectivo parecer por parte de potenciais clientes ou outros agentes interessados em diferentes indústrias, nomeadamente a indústria médica, farmacêutica, alimentícia, mecânica e espacial, ver imagem 1 [3],[4].

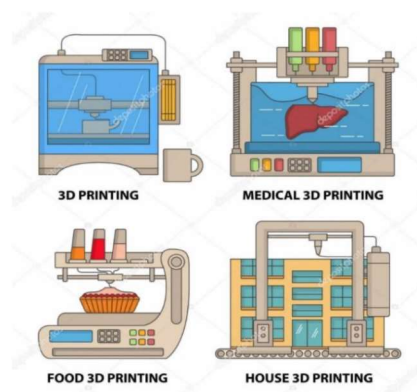


Imagem 1 – Diferentes indústrias que aplicam na 3DP [6]

Contudo, a principal vantagem deste novo modo de desenvolvimento de produto é a capacidade de criar amostras físicas diretamente a partir de informação digital, mais concretamente através de programas informáticos suportados por BIM (*Building Information Modelling*) e CAD (*Computer Aided design*) convertido para um formato (.*stl*), posteriormente um software de segmentação que converte objetos em várias camadas, permite simplificar e acelerar todo o processo de produção de objetos tridimensionalmente complexos [5].

O início da impressão 3D remonta a 1976, quando a impressora a jato de tinta foi inventada. Em 1984, algumas adaptações e avanços no conceito de jato de tinta transformaram a tecnologia de impressão de tinta em impressão com materiais. Nas últimas décadas, houve grandes variedades de aplicações para a tecnologia de impressão 3D que se desenvolveram em vários setores. A seguir, apresentamos um breve histórico dos principais marcos que foram alcançados ao longo do caminho [6]:

- 1986: Chuck Hull inventa o aparelho de estereolitografia (SLA);
- 1987: Carl Deckard transforma pó solto em sólido;
- 1989: S. Scott Crump, inventa o método de fabricação aditiva (FDM);
- 1999: o uso de órgãos impressos em 3D empregues pela indústria farmacêutica e pela medicina;
- 2008: A primeira perna protética impressa em 3D é criada e usada;
- 2011: A primeira aeronave não tripulada impressa em 3D do mundo.
- 2018: Pequeno objetos, casas, bio impressão 3D ou próteses, impressão 3D.

2.3 CATEGORIAS DE PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D

Dado ao desenvolvimento das pesquisas sobre o assunto, houve uma expansão na gama de materiais com os quais é possível a manufatura, o que levou materialização de distintas categorias de AM. De acordo com o padrão ISO/ASTM 52900:2021, as técnicas de AM/FA são amplamente classificadas em 7 categorias [7], [8]:

- Jato de ligantes (*Binder Jetting*);
- Deposição de Ligantes (*Directed Energy Deposition*);
- Extrusão de Material (*Material Extrusion*);
- Jateamento de Material (*Material Jetting*);
- Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*);
- Laminação de Folhas (*Sheet Lamination*);
- Fotopolimerização em Cuba (*Vat Photopolymerization*);

Na imagem 2 foi criada como uma representação visual para ilustrar as principais características de cada categoria, permitindo uma análise mais clara e uma compreensão mais aprofundada das suas nuances. Na imagem, cada categoria de processo é representada por um conjunto distinto de elementos e etapas, dispostos hierarquicamente para demonstrar sua estrutura e fluxo. Através dessa visualização, é possível identificar as relações de dependência entre as diferentes etapas, bem como as decisões e pontos de controle que cada categoria envolve. Essa análise comparativa permite aprofundar o conhecimento sobre os processos e suas implicações em diversos campos, como gestão de projetos, produção industrial, desenvolvimento de software, entre outros. Ao compreender as características distintas de cada categoria, os profissionais e pesquisadores estarão mais bem preparados para selecionar o modelo de processo mais adequado às necessidades específicas de suas atividades, promovendo uma eficiência e eficácia superiores em suas empreitadas:[9]

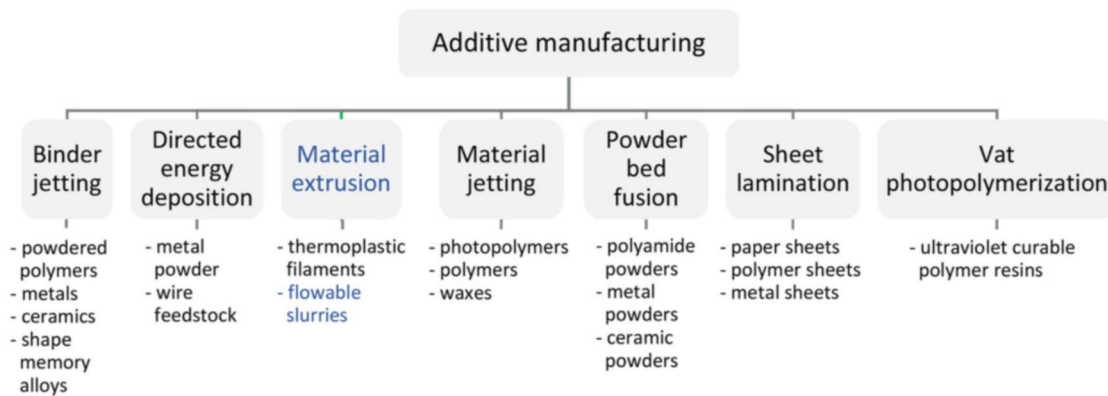


Imagem 2 - Sete categorias de AM [14, 13]

- **JATEAMENTO DE MATERIAL (BINDER JETTING);**

Deposição seletiva de gotículas da edificação material camada por camada para produzir um objeto, normalmente, o típico os materiais aplicados são fotopolímeros e ceras, ver imagem 3;[10]

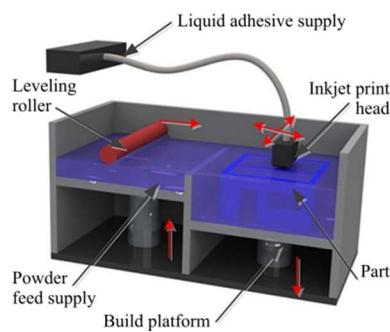


Imagem 3 - Imagem ilustrativa da tecnologia de impressão Material Jetting [11]

- **DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA (DIRECT ENERGY DEPOSITION);**

O processo DED cria peças através da fusão de material em pó ou fio de alimentação à medida que é depositado. O material é derretido camada por camada e utiliza metais como o titânio e o cobalto-cromo. Este processo é utilizado apenas na produção de aditivos metálicos.

Há dependência de estruturas de suporte densas, não sendo ideal para a produção de peças a partir do zero, sendo ideal para reparar ou adicionar material a componentes existentes (tais como lâminas de turbina), ver imagem 4.

Metais (aço para ferramentas, aço inoxidável, titânio comercialmente puro, ligas de titânio, ligas de alumínio, ligas à base de níquel, ligas à base de cobalto, ligas à base de cobre, ouro, prata e combinação de material em pó) [12].

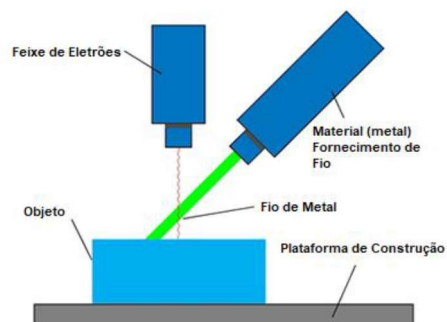


Imagem 4 - Ilustração da tecnologia de impressão DED [12]

- **EXTRUSÃO DE MATERIAL (MATERIAL EXTRUSION);**

A Extrusão de Material, também conhecida como Material Extrusion em inglês, é outra técnica amplamente utilizada na manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D. Nesse processo, o material em estado semi-sólido é forçado através de um bico aquecido e depositado em camadas sucessivas para criar um objeto tridimensional, ver imagem 5 [13].

O processo de Extrusão de Material geralmente procede-se pela preparação do material, aquecimento do bico de extrusão é aquecido a uma temperatura controlada garantindo que o material dentro dele atinja um estado semi-sólido adequado para a deposição camada por camada. No entanto, a resolução e a precisão podem ser menores em comparação com algumas outras técnicas de impressão 3D mais avançadas.

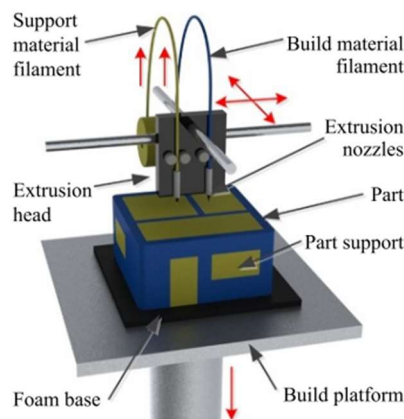


Imagem 5 - Imagem ilustrativa da tecnologia de impressão Material Extrusion [14]

- **FUSÃO EM LEITO DE PÓ (POWDER BED FUSION);**

Fusão de leito de pó, conhecida como Powder Bed Fusion (PBF), é uma técnica de manufatura aditiva que permite criar objetos tridimensionais camada por camada, a partir da fusão de materiais em pó. Essa técnica é frequentemente utilizada em diversas indústrias, como aeroespacial, automotiva, médica e de joalheria, devido à sua capacidade de produzir peças complexas com alta precisão e qualidade, ver imagem 6 [10].

O processo de impressão de Fusão de Pó geralmente envolve a preparação de pó, a preparação de pó numa plataforma de construção e posteriormente uma fonte de energia como um laser ou feixe de elétrons é direcionada para a área específica de camada de pó de acordo o padrão da peça a ser construída.

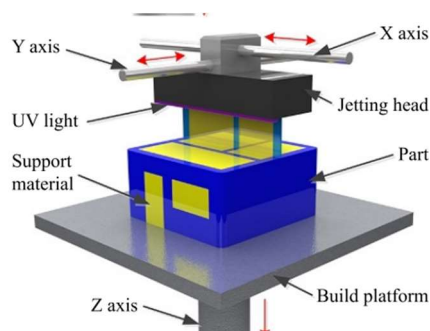


Imagem 6 - Ilustração da tecnologia de impressão powder bed fusion [14]

- **LAMINAÇÃO DE FOLHAS (SHEET LAMINATION);**

Tem como finalidade colagem de folhas de material para produzir um objeto. Dependendo do material, as camadas podem ser unidas por cola ou revestimento adesivo (folhas de papel e polímero) ou soldagem ultrassônica (chapas de metal) podem ser usadas;[3], [10].

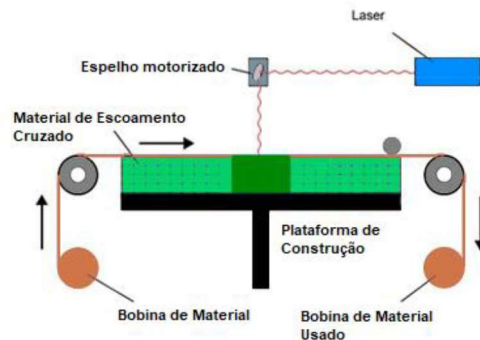


Imagem 7 - Ilustração da tecnologia de laminação de folhas [14].

- **FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA (VAT PHOTOPOLYMERIZATION);**

A cura seletiva de uma cuba de líquido fotopolímero ativada por luz, via laser ou projetor. O material típico usado é o polímero curável ultravioleta resinas [14].

Todas estas sete famílias de processamento têm níveis distintos de complexidade como resultado de cada modo de funcionamento, que afeta não só os acabamentos e a qualidade das superfícies, afeta também as propriedades estruturais, produtividade e o custo de objetos a produzir a seleção de um processo de AM entre os diferentes métodos disponíveis depende do material que vai ser usado na aplicação pretendida que implica um determinado conjunto de requisitos.[3]

Atualmente, numerosos projetos de pesquisa estão estudando diferentes formas de implementação do 3DP para indústria da construção com vários grupos desenvolvendo impressoras de 3D de grande escala, mas as tecnologias desenvolvidas diferem em termos de técnicas de impressão e materiais.

Para uma melhor compressão da propagação das investigações e seus respectivos processos de AM, uma visão geral é apresentada na imagem 8 [15].

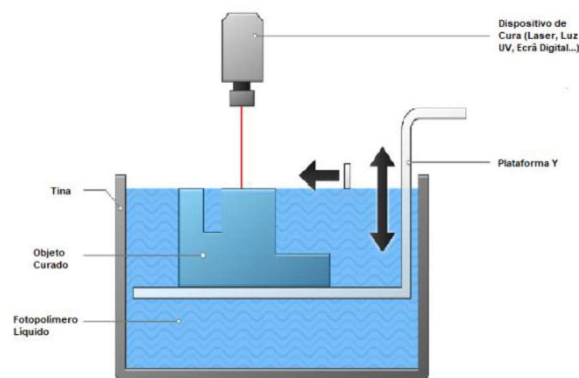


Imagem 8 - Ilustração da tecnologia de Fotopolimerização em Cuba [14].

Quadro 1 - Vantagens e Limitações dos processos de produção com tecnologia de Fabrico Aditivo.

Processo	Vantagens	Limitações
Material Extrusion	Rentabilidade na produção de peças termoplásticas e protótipos personalizados; • Prazos de entrega curtos (tão rápidos como a entrega no dia seguinte); • Vasta gama de materiais	Precisão dimensional e resolução, não adequado para produção de peças com detalhes complexos; • Necessidade de pós-processamento para acabamento suave. • Mecanismo de aderência de camadas torna as peças inerentemente anisotrópicas.
Powder bed fusion (PBF)	Liberdade de desenho, permitindo a produção de geometrias complexas; • Resistência e rigidez elevadas tanto nas peças metálicas como plásticas;	Rugosidade da superfície; Porosidade interna das peças impressas; • Distorção das peças durante o processamento; • Dificuldades associadas ao manuseamento e eliminação do pó.
Material jetting	Múltiplas capacidades de impressão de material. Exemplo: Capacidade de imprimir componentes rígidos e de borracha no mesmo tabuleiro, dentro da mesma peça, e também como uma mistura, para formar novas propriedades do material; • Criação de uma parte homogênea à medida que as camadas são curadas ao longo do processo de impressão e superfícies lisas.	Elevado custo; Propriedades mecânicas frágeis dos fotopolímeros ativados por UV.
Direct Energy Deposition (DED)	Capacidade de controlar a estrutura do grão, permitindo a reparação de peças funcionais; • Produção de peças relativamente grandes; • Este processo permite produção de estruturas híbridas utilizando múltiplos materiais com diferentes composições	Necessidade e pós processamento Material utilizado é limitado
Sheet lamination	Velocidade de impressão 3D e custo de produção baixo; • Facilidade de manuseamento do material; • Facilidade e rapidez no corte da peça.	Um dos processos menos precisos; • Acabamentos podem variar dependendo do material (papel ou plástico), e possível necessidade de pós-processamento; • Material limitado
Binder jetting	Produção de peças metálicas e protótipos a cores com custo mais reduzido que outros processos (Material Jetting e PBF); • Peças grandes e geometrias metálicas complexas. • Sem limitação de efeitos térmicos (por exemplo, entortamento); • Ideal para a produção de lotes baixos e médios.	Produção de peças metálicas com propriedades mecânicas inferiores (maior porosidade) a outro processo (PBF); • Peças frágeis e possibilidade de fratura durante o pós-processamento; • Seleção mais limitada de material para produção.
Vat Photopolymerization	Produção de peças metálicas e protótipos a cores com custo mais reduzido que outros processos (Material Jetting e PBF); • Peças grandes e geometrias metálicas complexas. • Sem limitação de efeitos térmicos (por exemplo, entortamento); • Ideal para a produção de lotes baixos e médios.	Produção de peças metálicas com propriedades mecânicas inferiores (maior porosidade) a outro processo (PBF); • Peças frágeis e possibilidade de fratura durante o pós-processamento; • Seleção mais limitada de material para produção

Fonte: adaptado de [16] e [17].

2.4. APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D EM VÁRIOS TIPOS DE INDÚSTRIA

A tecnologia, à semelhança do computador e telemóvel, à medida que evoluiu e começou a ser consumida, tornou-se mais barata, móvel e por isso mais acessível, conseguindo dessa forma ingressar em diversos mercados, que deram o seu próprio contributo para o seu desenvolvimento. Também a expiração de algumas patentes chave que estavam a contrair o mercado, nomeadamente uma relacionada com o processo FDM (um dos mais baratos) em 2009, permitiu uma grande expansão no domínio desta tecnologia e deu origem ao boom que se fez sentir no início da presente década [17],[27].

Atualmente está presente em diversas indústrias, laboratórios e centros de investigação, já existindo também modelos profissionais – orientados para empresas e escolas – e modelos pessoais, dirigidos para uso particular, ver imagem 9 [18].

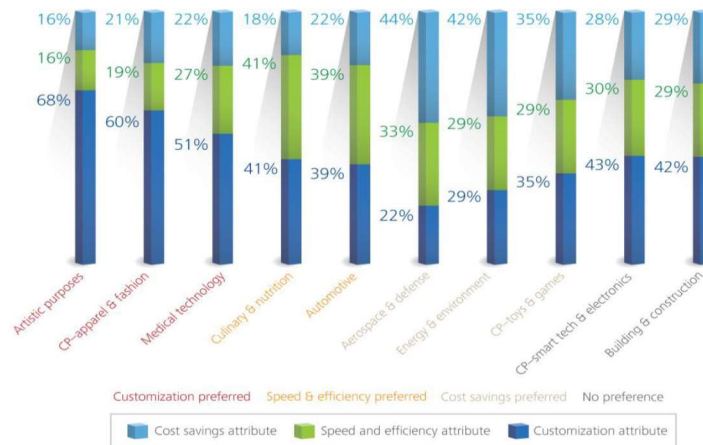


Imagem 9 -Principais áreas de aplicação da Impressão 3D e atributos preferenciais, estudo desenvolvido pela Deloitte [18].

2.3.1.3DP na Indústria automotiva: A impressão 3D é utilizada para prototipagem rápida, fabricação de peças personalizadas, ferramentas e dispositivos de produção, além de componentes leves e otimizados para desempenho;[19]

2.3.2.3DP na Indústria aeroespacial: A manufatura aditiva é aplicada na produção de componentes de aeronaves, como peças de motores, dutos de ventilação e protótipos funcionais, oferecendo redução de peso e maior eficiência;[20]

2.3.3. 3DP na Saúde e medicina: A impressão 3D é usada para criar modelos anatômicos personalizados, próteses, dispositivos médicos, guias cirúrgicos e até mesmo órgãos e tecidos em desenvolvimento para transplantes no futuro;[21]

2.3.4. 3DP na Indústria de joias: A manufatura aditiva permite a criação de joias personalizadas e complexas, permitindo designs intrincados e únicos;[22]

2.3.5. 3DP na Setor de arquitetura e construção: A impressão 3D é aplicada na construção de maquetes, protótipos de edifícios, elementos arquitetônicos e até mesmo estruturas completas em algumas abordagens inovadoras;[23], [24]

2.3.6. 3DP na Indústria de bens de consumo: Algumas empresas usam a impressão 3D para prototipagem rápida e produção em pequena escala de produtos, como utensílios domésticos, calçados personalizados e acessórios;[25]

2.3.7. 3DP na Indústria de defesa e militar: A manufatura aditiva é empregue para a produção de peças de equipamentos militares, protótipos, ferramentas de campo e dispositivos táticos;[26]

2.3.8. 3DP na Indústria de alimentos: Embora ainda seja uma área em desenvolvimento, a impressão 3D de alimentos é utilizada para criar formas e texturas interessantes em alimentos e para pesquisas em alimentos personalizados ou dietas especiais; [27]

2.3.9. 3DP na Indústria de energia: A impressão 3D é usada para fabricação de peças de turbinas eólicas, componentes de usinas nucleares e outras aplicações em energia.[28]

3

CASO DE ESTUDO

3DP NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um mapeamento global do estado atual da 3DPC na IC, abrangendo centros de pesquisa, *start-ups* e universidades. Várias aplicações do processo de FA foram desenvolvidas em diferentes campos para se adaptarem ao setor da construção civil.

Núcleos de pesquisa em universidades, empresas de arquitetura e construção, e mesmo iniciativas independentes de indivíduos têm contribuído para o desenvolvimento de ideias inovadoras, muitas vezes levando à criação de *start-ups*. No entanto, é importante notar que a quantidade de informações publicamente disponíveis sobre cada caso varia, e alguns casos serão abordados superficialmente, mas suficientes para compreender o processo tecnológico e suas implicações.

A maioria desses projetos, como o desenvolvimento de novos materiais, está em andamento e são provas de conceito, ou seja, modelos experimentais para comprovar o conceito de construção 3D, que ainda está em fase empírica. Portanto, não devem ser interpretados de forma definitiva, mas sim projetando suas potencialidades futuras.

No setor da construção, o software de BIM já está amplamente implementado e em constante desenvolvimento, o que não representa um obstáculo para a implementação da 3DPC.

No entanto, os principais desafios estão relacionados às outras três características fundamentais do processo: os materiais utilizados, as máquinas de grande formato responsáveis pela produção e os modelos de negócio das principais empresas que adotam essa tecnologia.

Existem diversos materiais sendo utilizados, desde os tradicionais com algumas adições até os completamente inovadores, com ênfase na busca por materiais biodegradáveis e recicláveis.

Para obter uma compreensão mais detalhada da 3DPC em todo o mundo, são apresentados alguns exemplos de empresas e obras que utilizam essa tecnologia, embora a limitação bibliográfica impeça uma análise mais aprofundada. Os exemplos selecionados são:

A *IAAC* – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, *WASP*; *Apis Cor 3D*; *DUS Architects*; *MX3D*; *Winsun*; *COBOD*; *CyBE*; *D-Shape*.

Esses exemplos representam uma amostra das iniciativas relevantes no campo da construção 3D e proporcionam uma visão sobre as possibilidades e desafios que a tecnologia enfrenta no setor da construção civil.

3.1.2 CATEGORIAS DE IMPRESSÃO 3D NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A pesquisa e desenvolvimento de sistemas de construção digital, que utilizam materiais cimentícios e outros recursos, têm se tornado um tema de grande relevância no campo da Arquitetura e Engenharia Civil (AEC), devido ao contínuo aprimoramento das técnicas de impressão 3D. A primeira tentativa documentada de empregar materiais à base de cimento para a impressão tridimensional remonta a 1996, quando Joseph Pegna propôs essa inovação, como ilustrado na Figura 10[9].

No entanto, foi somente com o trabalho de Khoshnevis et al. em 1998 que o verdadeiro potencial da impressão 3D aplicada à construção civil foi destacado. Eles introduziram a técnica conhecida como "Contour Crafting" (CC), que essencialmente se baseia no processo de extrusão de material. Essa abordagem se tornou a metodologia predominante na impressão 3D para a indústria da AEC.

Neste contexto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos nessa área têm proporcionado avanços significativos, abrindo portas para uma transformação substancial na maneira como abordamos a construção civil e a arquitetura, com potenciais benefícios em termos de eficiência, sustentabilidade e inovação tecnológica [29].

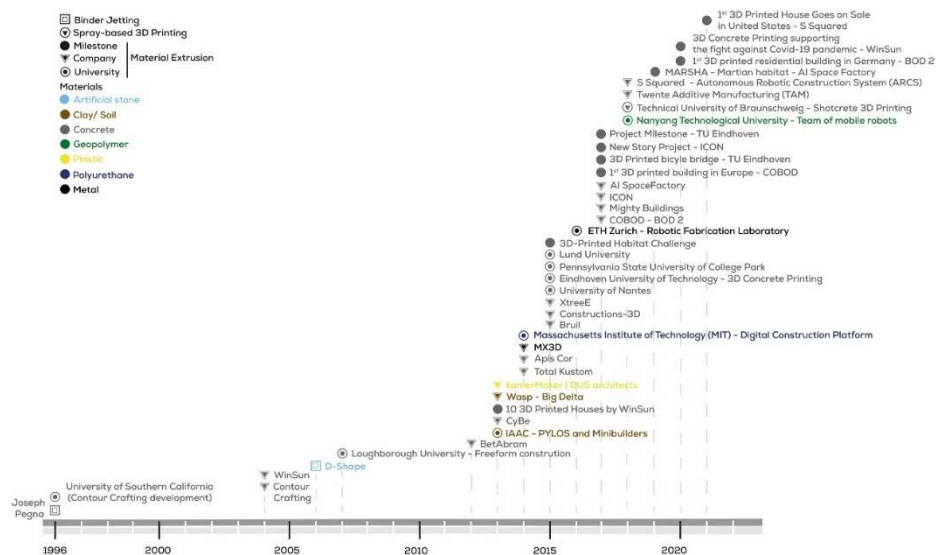


Imagem 10 - Evolução do 3DPC: em empresas, universidades e alguns dos marcos mais importantes [30]

3.1.3 COUNTOR CRAFTING

Desenvolvida na *University of Southern Califórnia*, a técnica designada por *Contour Crafting* (CC) é uma técnica de impressão 3D que, ao contrário das demais, é a única capaz de fornecer componentes grandes o suficiente para estruturas de construção, além de dispensar o uso de cofragens [31].

Trata-se de uma tecnologia de fabricação aditiva a que faz uso de um sistema robotizado em formato de pórtico que carrega e mobiliza o bico de impressão através de duas faixas paralelas instaladas no local da construção como é ilustrado na imagem 11.

O sistema importa o projeto de construção através de um software CAD 3D, que pode sofrer customização até durante a fase de impressão final. Em relação ao processo de execução, o aparelho desloca-se na horizontal com auxílio das faixas paralelas e circunvaga todo o perímetro da estrutura, a despejar camadas de betão através de um bico.

Terminado todo o perímetro da camada, o bico de impressão movimenta-se verticalmente na distância equivalente à espessura da camada que foi despejada, dando assim início a uma nova camada [32].



Imagem 11 - Ilustração de um sistema de Contour Crafting em ação [95]

Aditivos especiais e fibras são usados na mistura de argamassa de concreto para tornar cada camada dura o suficiente para suportar a próxima camada quando o bocal circunvaga toda a estrutura. Este sistema permite a instalação de todas as condutas hidráulicas, elétricas e de ar condicionado, além do reforço estrutural com “armaduras”, eventualmente necessário.

Todos estes são instalados em pequenos segmentos incorporados através de camadas de betão que estão a ser despejadas pela máquina CC, para não impedir o seu movimento [33].

A respeito de acabamentos, como argamassa e cerâmicos, podem ser adicionados normalmente às superfícies das paredes impressas, uma vez que no final, as paredes serão equivalentes a paredes feitas de betão de modo tradicional, o que também permite aplicar futuramente tinta, ver imagem 12.



Imagem 12 - Assemblagem de revestimento cerâmico em paredes impressas [21].

Para as caixilharias, é necessário criar o vão com o uso dos softwares que serão responsáveis por fornecer os comandos ao equipamento de CC, sendo necessário recorrer a suportes provisórios para elementos horizontais, como foi dito anteriormente (cofragens e escoramentos), no capítulo 3 são exemplificados na prática como são executados esses elementos construtivos.

3.1.4 CONCRETE PRINTING

A segunda técnica de impressão 3D usada na IC é chamada de *Concrete Printing (CP)*, trata-se de um processo baseado em extrusão, semelhante ao *Contour Crafting*, ver imagem 13.

Esta técnica, no entanto, tem uma intensidade menor de deposição para alcançar maior liberdade tridimensional, pois permite maior controle das geometrias internas e externas.

Contudo, assim como ocorre com o D-Shape, a técnica CP também requer suporte adicional para criar recursos de forma livre e requer manutenção e limpeza após o uso. Um dos subprodutos desse processo é o estriado acabamento da superfície, uma vez que a superfície resultante é fortemente dependente da espessura da camada [32]

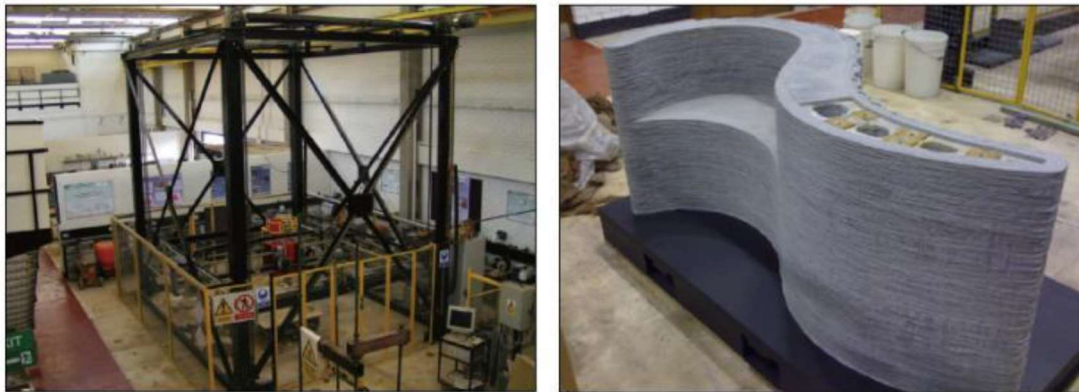


Imagem 13- Sistema de impressão CP [20]

3.1.5 D-SHAPE

A técnica D-Shape envolve a deposição de uma mistura de materiais, incluindo agregados, fibras e óxidos metálicos, em uma superfície. Essa mistura é aplicada na espessura desejada e compactada. Para fazer isso, usa-se uma cabeça de impressão com 300 bicos, montada em uma estrutura de alumínio em formato de pórtico. Essa cabeça de impressão se move sobre a área de impressão, depositando o aglutinante nos locais onde a peça precisa ser solidificada.

Após a conclusão da impressão em uma camada, a peça é retirada do leito de pó solto, e uma nova camada de pó é aplicada. Esse processo é repetido verticalmente até que a estrutura desejada seja construída. Embora a tecnologia D-Shape seja usada para imprimir edifícios ou blocos de construção, existem poucos exemplos documentados de edifícios criados através dessa técnica. Um desses raros exemplos é a *Ferreri House*, que pode ser vista na imagem 14 [22].



Fonte: D-Shape

Imagem 14 - The Ferreri House construído usando o método D-Shape [23].

O design da *Ferreri House* é notavelmente simples, composto por quatro paredes medindo 2,40 metros por 4 metros. Ele inclui um quarto de banho, uma área de cozinha e um quarto. A casa foi impressa usando uma impressora D-Shape, que é capaz de criar estruturas complexas de forma livre. No entanto, para criar saliências e outros recursos de forma livre, a impressora D-Shape requer suporte adicional.

O processo de impressão é baseado em pó e utiliza material não consolidado para criar esse suporte. Uma desvantagem desse método é que ele requer um dispositivo de deposição adicional, o que aumenta a necessidade de instruções de manutenção, limpeza e controle. Além disso, após a impressão, a estrutura secundária de suporte deve ser removida em uma operação de pós-processamento. A imagem 14, parte 2, mostra esse processo, no qual o material de suporte deve ser retirado para revelar a estrutura impressa final.

A Ferreri House foi exposta na *Triennale di Milano* e está localizada no topo de uma colina na propriedade do arquiteto Ferreri. Este projeto demonstra a aplicação inovadora da tecnologia de impressão 3D na construção de habitações e os desafios associados a esse processo [34].

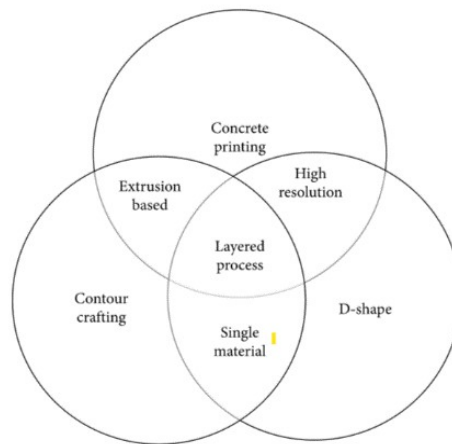


Imagem 15 - Diagrama de Venn das 3 técnicas de impressão 3D [22].

Ainda sobre as diferenças entre os 3 métodos, é possível compará-los através de diversas características através do diagrama de Venn acima (imagem 14) e no quadro a seguir:

Quadro 2 - Principais pontos dos métodos de impressão empregues na construção civil

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	MÉTODOS		
	Countor Crafting (CC)	3D Concrete Printing	D-Shape
Processo	Extrusão	Extrusão	Pulverização
Materiais	Compósitos cimentício	Compósitos Cimentício	Agregados em pó e material aglutinante
Velocidade	Baixa	Alta	Média
Dimensões	Estrutura em larga escala	Estrutura em larga escala	Estrutura em média escala
Vantagens	Alisamento de superfície com espátula; Personalização dos materiais impressos de forma inteligente, possibilidade de embutir condutas de infraestruturas.	Alta resistência e velocidade de construção.	Alta Resistência
Desvantagens	Baixa velocidade de impressão; Baixa força de aderência entre as camadas.	Exigência de desenvolvimento de misturas com alto desempenho.	Baixa resolução, necessidade de uma grande quantidade de materiais em pó, necessidade de remoção dos pós excedentes.

Fonte: adaptado de [35].

3.2 APLICAÇÃO DE IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A 3DPC por se tratar de uma tecnologia relativamente recente e pouco desenvolvida, apresenta alguns desafios em sua introdução na indústria da Construção Civil. Esta indústria opera em grande escala com meios e equipamentos não convencionais, e não tem visto uma revolução tecnológica significativa nas últimas décadas.

No entanto, várias empresas e entidades investissem tempo e recursos no desenvolvimento de diversos projetos utilizando a tecnologia da impressão 3D. Esses esforços resultaram em soluções inovadoras que se mostraram muito úteis para a Construção Civil.

Espero que esta formatação atenda às suas necessidades. Se você tiver alguma outra solicitação ou desejar alguma alteração específica, por favor, me informe, e ficarei feliz em ajudar [36].

- **DESIGN DE PRODUTO:**

Os designers de interiores podem usar a impressão 3D para criar objetos personalizados e também utilizada na área do design para acelerar o desenvolvimento de protótipos de forma econômica, transmitir melhor as ideias a clientes e fabricantes externos e testar novas ideias com maior liberdade, na imagem 16 é possível ver a liberdade criativa que a impressão pode alcançar. Com isto, a indústria da construção melhorou bastante os seus serviços fazendo com que tanto o cliente como quem prestam o serviço sejam beneficiados, pois o cliente tem à sua disposição um leque mais vasto de opções e o prestador de serviços além de poupar tempo e custos, ganha também prestígio pela sua maior flexibilidade para com o cliente [37].



Imagem 16 - Mobiliários impressos em 3D [25].

- **COMPONENTES E LIGAÇÕES METÁLICAS:**

Atualmente, com a ajuda da impressão 3D, já é possível eliminar o problema mais comum referente às ligações metálicas: a sua complexidade geométrica. Utilizando a tecnologia de fabrico aditivo, as complexidades das peças já não requerem um custo acrescido, permitindo que diferentes funções possam ser combinadas num único modelo. Por exemplo, agora é possível imprimir de uma só vez peças que antes seria necessário realizar a montagem das suas partes, aparafusando-as ou soldando-as.

Assim, não só se poupou no custo de produção, como também no custo de manutenção, pois como se trata de elementos de ligação única, é possível eliminar anomalias como a estanquidade dos elementos que são normalmente provocados por erros de operação durante a montagem. Outro benefício é a possibilidade de adicionar ou melhorar a funcionalidade das peças e o design exemplo imagem 17, que trata de ligações de nó de fachada [38].

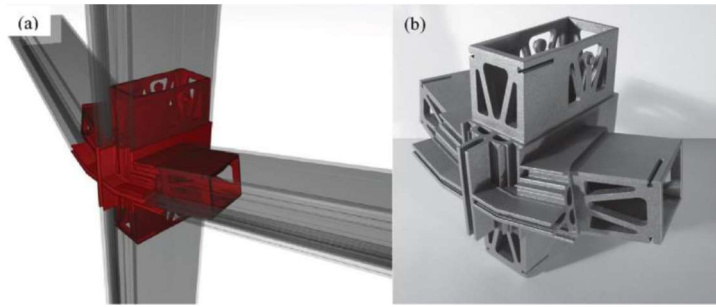


Imagem 17 - Renderização de um nó de fachada e um protótipo de nó de alumínio em tamanho real [26].

• REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIO

Os trabalhos de restaurar nem sempre são simples, podendo existir algumas restrições e constrangimentos que podem afetar o resultado esperado como a replicação perfeita da estrutura antiga. Estes obstáculos estão muitas vezes relacionados com intervenções incompatíveis com a estrutura, falta de documentos e mapeamentos ineficazes. Outro entrave deve-se ao facto de que os materiais usados no passado se basearem em pedra e alvenaria, geralmente com detalhes complexos, como gravuras e ornamentos. Reproduzir ou reconstruir estas peças, por norma, constitui uma tarefa difícil pois existe sempre o risco de provocar ainda mais danos à estrutura. Com o desenvolvimento da tecnologia digital, é possível superar estes problemas. Sistemas como a digitalização tridimensional (*3D scanning*) e medição fotogramétrica de formas têm a capacidade de medir a dimensão espacial das estruturas e de artefactos existentes. Fazendo a combinação destes sistemas com a tecnologia da impressão (3DPC) consegue-se formar inúmeras aplicações possíveis para auxiliar os trabalhos de restauro ou reconstrução, na imagem 18, é possível visualizar partes impressas destinadas a reabilitação de um edifício [39].

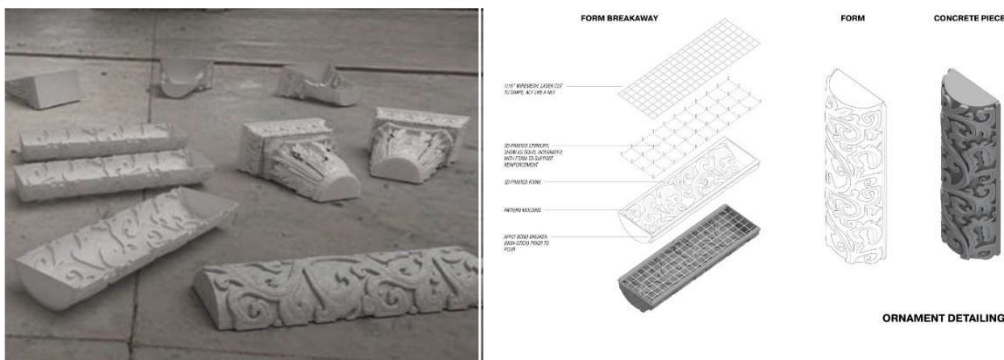


Imagem 18 - Peças produzidas com recursos de impressão destinadas a reabilitação de um edifício antigo [9].

Com esta nova técnica que combina a produção de molduras de betão com a impressão 3D é possível criar várias texturas, acabamentos e padrões únicos, apenas possíveis com a aquisição de peças pé fabricadas. Embora a sua pesquisa tenha um impacto positivo, sobretudo nos métodos de preservação de edifícios históricos, esta apresenta-se também como uma ferramenta útil para a construção de fachadas com formas mais alternativas [52].

• ESTRUTURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO

À medida que a tecnologia foi evoluindo, novas técnicas de isolamento térmico foram surgindo, respondendo à necessidade de atingir metas atuais e exigentes, relativamente à eficiência energética dos edifícios. Por exemplo, um dos objetivos da União Europeia (UE) para 2020 é a construção de edifícios exclusivamente com necessidades quase nulas de energia. Isto só será possível a partir da criação de novos processos de engenharia e de arquitetura, assim como da introdução de isolantes térmicos inovadores.

Neste sentido, em 2017, investigadores do Instituto Wyss da Universidade de Harvard, em conjunto com a Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas (*SEAS*) e o Instituto de Tecnologia

de Massachussets (MIT), inspiraram-se em estruturas celulares naturais para desenvolver um novo processo de Impressão 3D de materiais com macro ajustável e com porosidade em microescala, utilizando tinta de espuma cerâmica. A impressão da tinta realiza-se diretamente, de forma a criar uma estrutura com a forma de favos de mel hexagonais e porosos, ver imagem 19.

Quando esta se solidifica, a peça resultante é constituída por ar e cerâmica, em várias escalas de comprimento, sendo que a porosidade nas propriedades micro e macro determina as propriedades da estrutura. Desta forma é possível criar estruturas mais leves a partir de tecnologias de Impressão 3D, possibilitando a aplicação desta nova abordagem em estruturas de isolamento térmico. E embora a equipa de investigadores se tenha focado num único material cerâmico neste estudo, as tintas de espumas para impressão podem ser à base de outros materiais, como metais e polímeros [23].

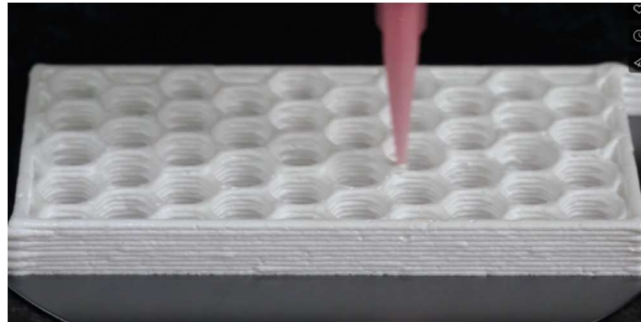


Imagem 19 - Processo de impressão de estrutura de isolamento térmico em espuma cerâmica [29].

- **ESTRUTURA PRÉ- FABRICADAS (OFF-SITE):**

Os edifícios modulares ou pré-fabricados correspondem a estruturas nas quais os elementos são fabricados fora do local da sua implantação, em módulos, sendo depois enviados para esse local e aí montados. Nos últimos anos, estes edifícios têm atraído especial interesse devido ao seu processo ser significativamente mais rápido que os tradicionais, bem como os seus processos sustentáveis e eficientes, algo semelhante às estruturas impressas em 3D. Com isto, a impressão 3D pode servir como ferramenta para a fabricação de edifícios modulares.

Comparada com a produção *in-situ*, a fabrico aditivo de edifícios fora do local de implementação tem uma maior adaptabilidade, pois no primeiro caso, o fabrico é feito em fábrica que contém todos os meios e o espaço necessário para a produção dos respetivos módulos. Posteriormente, serão enviados para o local onde o edifício será implementado para aí ser montado [3].



Imagem 20 - Transporte um empreendimento AI SmartHome construído com recurso da 3DPC [30].

Além disso, ao contrário do que acontece em construções fabricadas tradicionalmente, o formato das moradias *Haus* conferem uma eficiência energética superior aos requisitos estabelecidos pelos EUA para 2030. Assim, combinando a Impressão 3D com o sistema de casas inteligentes *AI SmartHome OS*, ver imagem 20, e os princípios de construção modernos, a *start-*

up oferece modelos em que não são produzidas quaisquer emissões de carbono. A empresa garante ainda que as suas moradias têm uma vida útil superior às tradicionais e que mantêm o seu espaço interior livre de 99% de vírus e bactérias e funcionam perfeitamente em qualquer clima [23] e [40].



Imagem 21 - Parte de parede impressa com escada embecida fabricada pela empresa IAAC e WASP [31] e [32]

Os centros de investigação IAAC (*Institute for advanced architecture of Catalonia*) e WASP (*empresa líder no mercado de projetos em Impressão 3D*) colaboraram para criar um protótipo inovador de uma parede totalmente impressa com tecnologia de impressão AM, ver imagem 21.

O protótipo de uma parede à escala real tem 40 cm de espessura, com elementos de madeira interligados que servem de suporte às escadas com as estruturas do piso projetadas precisamente para ficarem fixadas à parede, uma solução que representa um grande passo na realização de estruturas à base de terra, para suporte de cargas. O material empregue na construção do protótipo foi uma mistura de argilas e fibras de arroz, ver figura 22 [41].

A impressão da parede demorou cerca de 40 horas até ficar concluída e gastou no total 2 m³ de material. A modelação foi processada internamente, de forma a conferir a solidez necessária e a expressividade estética pretendida. Foi utilizado o equipamento “Crane WASP” como sistema colaborativo de impressão 3D, já frequentemente utilizado pela própria empresa, para construir casas à base de terra, argamassas de betão e geopolímeros. Este equipamento robotizado é capaz de transferir a lógica do formato para modelos de construções reais, permitindo desta forma a experimentação de sistemas arquitetónicos e estruturais inovadores e a promoção do desenvolvimento da Impressão 3D na IC[23].

Na imagem 22 e 23, apresenta-se outras opções de construção fabricadas fora do local de obra “off-site”, que foi fundamentalmente uma parceria entre as empresas *Hyperion Robotics* e a empresa Iberdrola com o objetivo de criar de fundações otimizadas para construção de uma subestação de energia, onde a equipe adotou a opção de impressão por 3D para demonstrar a resistência do componente impresso em 3D, o protótipo apresenta uma redução significativa de 75% no uso de material em comparação com as fundações de concreto tradicionais, ver imagem 20 [42].

Durante o teste deste protótipo ficou comprovado que a fundação é capaz de suportar três vezes a carga projetadas, utilizando um quarto da quantidade normal de material [43].



Imagem 22 - Colocação das fundações no local de obra e comparação com sapata usando o método convencional [33]

- **SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**

Em um esforço para ajudar a sustentabilidade ambiental do planeta, especialmente recifes de corais, que são essenciais para a vida de milhares de espécies aquáticas, cientistas de vários centros de investigação tentam uma ampla variedade de métodos inovadores, alguns com mais sucesso do que outros. A prática de colocar esses recifes para fins de geração de algas remonta ao século 17, quando o Japão começou a usar entulho e pedras para gerar algas [44].

Desta forma para ajudar os recifes de corais empresas como CyBe e *Hyperion Robotics*, que empresas que trabalham com impressão de betão, desta forma facilitando a mimica de das formas orgânicas dos recifes com recurso do uso de impressoras de grande formato, fazem um esforço para ajudar a salvar os recifes naturais, ver imagem 24 e 25, os recifes artificiais criados por essas empresas são criados para imitar as funções dos recifes naturais e, portanto, desempenham a aproximadamente as mesmas funções. Para além de promoverem a diversidade oceânica, protegem também a linha de contra erosão [45].



Imagem 23 – Coral Impresso [45]



Imagem 24 – Coral na integrado na vida marinha [45]

- **ESTRUTURA DE BETÃO IN - SITU (3DPC)**

A impressão de betão in-situ é resultado do avanço da tecnologia de 3DPC abordados no capítulo 3.1.3, 3.1.4 e 3.1.5, como este recurso eliminam-se certas etapas que costumam ser muito demoradas, reduzindo assim a duração do processo de construção, o que, por inércia, reduz também os custos, o desperdício e a mão de obra. Fornece maior liberdade para construir formas mais complexas que normalmente não são passíveis de conceber pelos métodos tradicionais.

A aplicação do CC na construção civil é realizada por um sistema robótico em forma de pórtico, que carrega e movimenta o bico de impressão por meio de duas faixas paralelas instaladas no local da construção, ver imagem 26. A construção de um edifício ou de um conjunto de edifícios pode ser totalmente feito com recurso a um único e contínuo processo de impressão. Centros de pesquisas junto com empresas estão implementado os conceitos desenvolvidos até agora em protótipos [3].



Imagem 25- Imagem ilustrativa da impressão 3DPC in situ [20].

3.3 IMPRESSORAS DE GRANDE FORMATO

A impressão 3D de peças grandes (3DPC) tornou-se viável graças à implementação e ao uso de impressoras de grande formato. O sucesso dessa técnica é atribuído à integração da automação de ferramentas com a robótica, a mecânica e a computação, que funcionam como mecanismos de controle do sistema [10],[46].

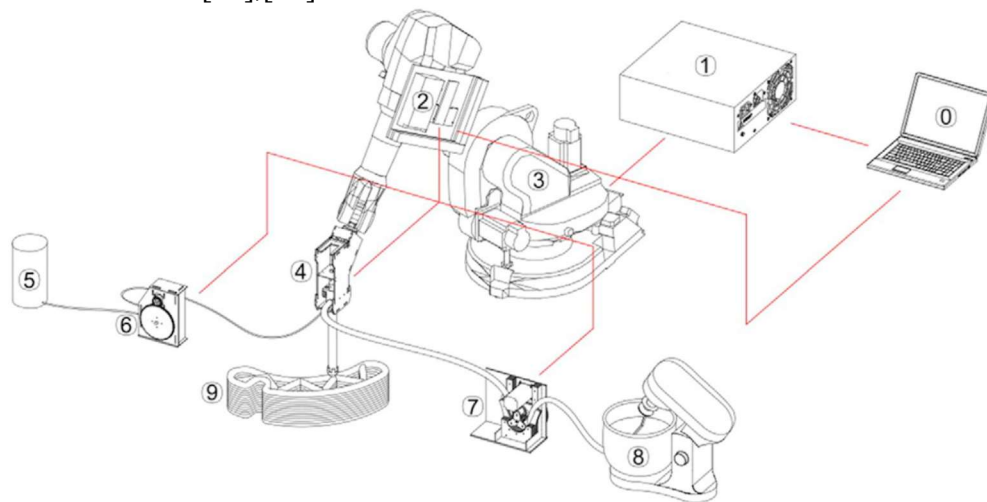


Imagem 26 - Configuração de uma impressora de grande formato [10].

Na imagem 26, apresenta-se a configuração de uma impressora de grande formato tipo braço robótico com 6 eixos, destacando-se os principais componentes envolvidos no processo [10]:

0. **Comando do sistema:** Responsável por gerenciar toda a operação da impressão 3D.
1. **Controlador de robô:** Encarregado de controlar os movimentos do braço robótico durante o processo de impressão.
2. **Controlador de impressão:** Responsável pela gestão dos parâmetros da impressão e coordenação geral do processo.
3. **Braço robótico:** Efetua os movimentos precisos e controlados para depositar o material de impressão em camadas.
4. **Cabeça de impressão:** O componente que deposita o material de impressão camada por camada, conforme as instruções recebidas.
5. **Agente acelerador:** Substância utilizada para acelerar a solidificação ou cura do material de impressão.
6. **Bomba peristáltica para agente acelerador:** Responsável por fornecer o agente acelerador à cabeça de impressão, garantindo a quantidade adequada.
7. **Bomba peristáltica para pré-mistura:** Fornece a quantidade correta de material de impressão pré-misturado para a cabeça de impressão.

8. **Pré-misturador:** Mistura os componentes do material de impressão antes de ser fornecido à cabeça de impressão.
9. **Objeto impresso em 3D:** O resultado do processo, ou seja, o objeto físico criado através da impressão 3D.

As impressoras de construção 3D de grande formato podem ser divididas em três categorias principais:

3.3.1 BRAÇO ROBÓTICO FIXO/MÓVEL

Consiste na utilização de um braço robótico de vários eixos para guiar o cabeçote de impressão que está instalado na extremidade frontal do braço. Esse tipo de robô tem a capacidade de se movimentar e é especialmente apropriado para cooperativas que possuam múltiplas unidades de impressão, exemplo dessas impressoras podem ser visualizados nas imagens 27 e 28.

A impressora móvel é capaz de se deslocar utilizando rodas antes e depois do processo de impressão, enquanto a impressora fixa só pode operar em um local estacionário. É importante salientar que as dimensões desses dois tipos de impressoras são restringidas pelo peso e tamanho do cabeçote de impressão. Fundamentalmente, as impressoras 3D controladas por braços robóticos são empregues principalmente para a fabricação de componentes menores e mais intrincados. Essas impressoras são adequadas para o uso de materiais de grão fino, ao passo que a utilização de materiais granulares maiores apresenta desafios [46].



Imagem 27 - Braço robótico móvel-CyBe [79]



Imagem 28 - Braço robótico fixo-CyBe [79]

3.3.2 SISTEMA DE PÓRTICO (GANTRY)

Esta tecnologia fornece uma solução de impressão monolítica no local de obra, após a impressão a máquina e armazenada no caminhão podendo ser realocada a outros canteiros de obra. É chamado de sistema de pórtico porque possui uma estrutura semelhante a um pórtico, com barras horizontais e verticais interconectadas, ver imagem 29. O funcionamento básico deste tipo de impressora é composto por: [47]

- Estrutura de pórtico: Composto por várias partes, incluindo barras verticais e horizontais (conhecidas como trilhos), um carro de impressão (que se move ao longo dos trilhos) e um mecanismo de elevação (que movimenta o carro verticalmente), ver imagem 29;
- Cabeça de impressão: é o responsável pela deposição de material de impressão que é fixada na barra de impressão denominada de carro de impressão;
- Movimentação do carro: é montado nos trilhos horizontais e pode se mover suavemente de um lado para o outro;
- Movimentação vertical: permite que o carro de impressão se movimente verticalmente isso permite o controle da altura ao longo da construção da peça;

- Software e controle: O sistema é controlado por meio de um software específico, o software fatia o modelo 3D em camadas individuais e gera os comandos de movimentos necessários para impressora mover-se verticalmente e horizontalmente.



Imagem 29 - Sistema de pórtico (gantry) da empresa COBOD [40].

Outro tipo de impressora de grande escala tipo pórtico é a *Crane WASP 3D*, ver imagem 30, que é uma combinação de uma impressora robótica e uma impressora estilo pórtico. O bico da impressora é suportado por uma coluna central e também é sustentado por uma estrutura metálica. Esta impressora é composta por uma coluna central e é sustentada por uma estrutura metálica hexagonal/radial que por sua vez sustenta o extrusor como é ilustrado nas imagens 30,31 e 32. Além disso, essas estruturas podem ser interligadas para criar estruturas maiores. Como resultado, a impressora é capaz de cobrir uma área de 100 m² [41].



Imagem 30 - Impressora Delta Big WASP [40].



Imagem 31 - Big Delta em ação e técnico fazendo inspeção da impressão



Imagem 32 - Extrusor da impressora Delta Big WASP [41].

Embora haja algumas semelhanças entre os métodos do pórtico e do braço robótico, eles são usados para finalidades diferentes e têm vantagens e desvantagens distintas, conforme explicado no quadro 3.

A diferença mais marcante é que um braço robótico geralmente tem um alcance limitado e é usado para produzir componentes menores de um edifício, frequentemente em locais externos. Por outro lado, um sistema de pórtico pode cobrir distâncias muito maiores e é capaz de construir edifícios inteiros no local [48].

3.3.4 GRUPO DE ROBÔS MÓVEIS (MINI-BUILDERS)

Os *Mini-builders* desenvolvidas pela *start-up* IAAC apresentam uma abordagem alternativa para impressão 3D em argamassa, com a utilização de três robôs. O processo decorre da seguinte forma: [23],[49].

O primeiro robô – Robô Base (Base Robot) – move-se ao nível do solo sobre duas “lagartas” e é responsável apenas pela deposição das primeiras 10 a 20 camadas de material (dependendo da espessura determinada), ou seja, a base da estrutura tal como o seu nome indica, ver imagem 31.

O segundo robô – Grip Robot (sem tradução) – foi desenhado para se poder instalar sobre a estrutura e para sobre ela se mover em todas as direções, através de quatro roletes. É responsável pela execução das restantes camadas, incluindo as que vão formar a cobertura. A sua cabeça de impressão pode mover-se transversalmente, permitindo assim a formação de superfícies curvas. É possível imprimir horizontalmente porque o processo de cura é extremamente rápido. Este processo é agilizado em parte devido à transmissão de calor efetuada por dois pequenos elementos aquecedores incorporados no robô, ver imagem 31.

O terceiro e último robô a atuar é conhecido por **Robô Vácuo (Vacuum Robot)**. O robô adere à superfície da estrutura por meio de uma ação conjunta entre uma ventosa e um gerador de vácuo. Tem uma função de reforço estrutural, ou seja, gera mais camadas sobre as anteriormente erguidas. Estas camadas não têm necessariamente de ser horizontais, e não têm de ser distribuídas uniformemente por toda a estrutura, podendo apenas ser aplicadas nas zonas críticas.

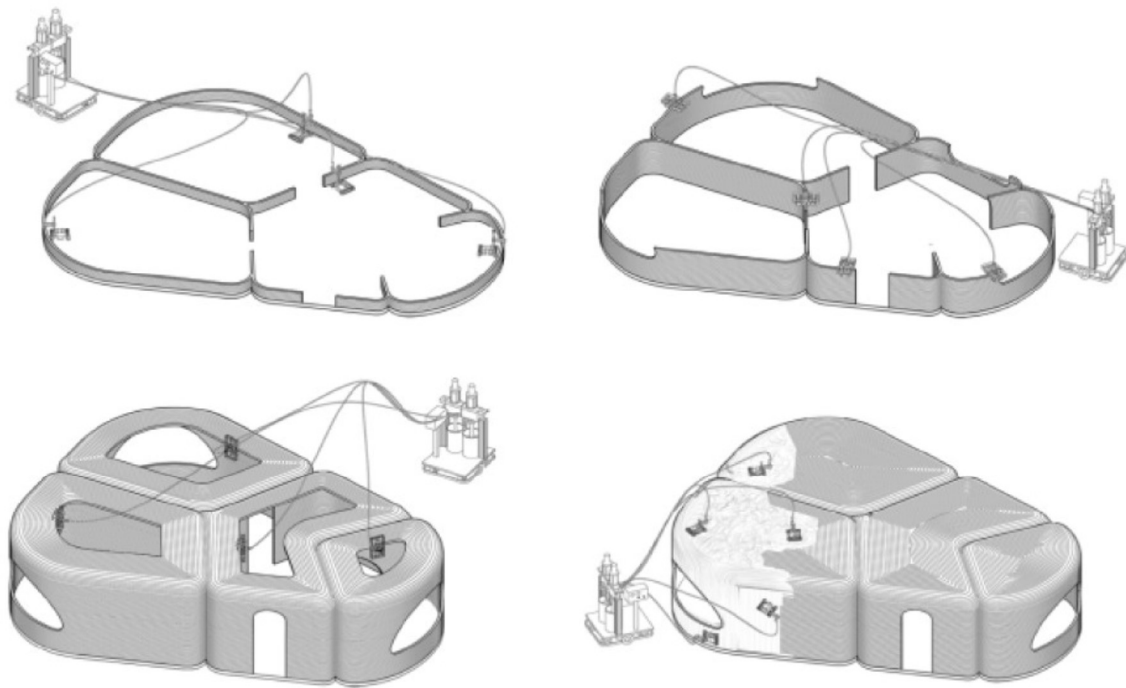


Imagem 31 - Esquema de funcionamento das impressoras tipo *mini-builders* desenvolvida pela IAAC [14].

Quadro 3 - Comparativo de tipos de impressoras [35],[34].

	Pórtico	Braço robótico	Mini - Builders
Local de impressão	No local	Fora do local	No local
Volume impresso	Alto	Baixo	Alto
Promessa para indústria	Prédios inteiros no local, alta produtividade, qualidade repetível	Elementos únicos e complexos do site, alta agilidade, geometrias complexas	Elementos únicos e complexos do site, alta agilidade, geometrias complexas
Concorrentes no mercado atual	Empreiteiros gerais (baixa habilidade)	Empreiteiros especializados (alta habilidade)	Empreiteiros especializados (alta habilidade)

Fonte: adaptado pelo autor/a.

O quadro 4 destaca que a extrusão de material é o processo predominante na indústria da Impressão 3D com Cimento devido à sua capacidade de lidar com as propriedades específicas dos materiais cimentícios. Esse método permite a personalização das impressões e o controle preciso do fluxo de material, resultando em estruturas resistentes e duráveis.

Embora existam outras técnicas, a extrusão é a mais proeminente para impressões de cimento. A pesquisa contínua na área impulsionará a evolução da 3DPC, beneficiando diversos setores industriais e a construção sustentável [9].

Quadro 4 - Mapeamento das entidades fabricantes de impressoras 3DP no mundo [49],[48].

Entidade Criadora	Criador	Processo	Material	Sistema	Mobilidade	Tecnologia Construção
Countour Crafting	Universidade da Carolina do Sul	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	Off - site
3D Concrete Printing	Universidade Tecnologia de Eindhoven	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	Off - site
Concrete Printing	Loughborough University	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	Off - site
Winsun	Winsun	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	Off - site
Total Kustom	Andrey Rudenko	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	On - Site
Vulkan II	ICON	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	On - Site
BOD2	COBOD International	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	On - Site
HuaShang Tengna	HuaShang Tengda	Extrusão de material	Argamassa	Gantry	Fixa	On - Site
Apis Cor	Apis Cor	Extrusão de material	Argamassa	Braço robótico	Fixa	On - Site
XtreeE	XtreeE	Extrusão de material	Argamassa	Braço robótico	Fixa	On - Site
CyBe RC 3Dp	CyBe Construction	Extrusão de material	Argamassa	Braço robótico	Móvel	On - Site
Mini Builders	IAAC	Extrusão de material	Polímero	Grupo de pequenos robôs	Móvel	On - Site
Multiple robot Printers	Universidade tecnológica de Nanyang	Extrusão de material	Argamassa	Grupo de pequenos robôs	Móvel	On - Site
Shortcrete 3D printing	Instituto de Design estrutural de Braunschweig	Material Pulverizado	Argamassa	Gantry	Fixa	Off - Site
D-Shape	Monolite UK	Jato de Ligante	Micro - Concreto	Gantry	Fixa	On - site
Digital Construction Platform	Media Lab (Massachusetts Institute of Technology)	Impresso no local de fabrico	Espumas de Poliuretano	Braço Robótico	Móvel	On - site
Flight Assembled Architecture	Instituto Federal Suíço de Tecnologia	Montagem de material	Tijolo de espuma	Robôs Aéreos	Móvel	On-site
Woodflex 56	Grupo Güdel	Montagem de material	Madeira	Gantry	Fixa	Off - site
Handrian X	Fastbrick Robotics	Montagem de material	Tijolo	Braço Robótico	Móvel	On -site
In situ fabricator	Instituto Suíço de Tecnologia	Montagem de material	Tijolo	Braço robótico	Móvel	On -site
Free FAB	Laing O'Rourke	Extrusão de material	Cerâmicas	Gantry	Fixa	Off - site

Fonte: Adaptado de [9].

3.5 MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO POR IMPRESSÃO 3D

Um aspecto fundamental da impressão 3D na construção é a grande variedade de materiais que podem ser usados, cada um com suas próprias vantagens e limitações. Neste capítulo, vamos explorar os diferentes materiais usados na impressão 3D na indústria da construção, analisando suas características, aplicações e possíveis impactos. Muitas start-ups, centros de pesquisa e universidades têm se dedicado à pesquisa e ao aprimoramento desses materiais: [30]

- **CIMENTÍCIOS**

As argamassas à base de cimento são materiais mais utilizados em 3DP no sector da construção, aditivos são adicionados para controlar e otimizar propriedades específicas no estado fresco e/ou endurecido [9].

Os componentes sugeridos para os materiais constituintes são os cimentos Portland, agregados siliciosos com um diâmetro de aproximadamente 1mm, enchimento de calcário, aditivos para facilitar a bombagem, modificadores reológicos para obter tixotropia na argamassa fresca. Também é sugerida a incorporação de fibras de polipropileno para reduzir fissuras devido à secagem precoce [50].

Para tornar uma mistura imprimível são necessárias algumas características como, ver imagem 35:

- **Trabalhabilidade** (*Workability*): é uma característica que facilita a bombagem e a extrusão, mas aumenta a possibilidade de deformação ou colapso da camada; [51]
- **Fluidez** (*Fluidity*): representa a capacidade do material de fluir através do sistema de impressão, controlada pela mediação da trabalhabilidade do material com os seguintes testes: tabela de fluxo, fluxo de queda e funil em “V” [52].
- **Bombeabilidade** (*Pumpability*): É a capacidade de o material ser bombeado do misturador para o bocal. Da mesma forma, para fluidez, essa propriedade está relacionada à viscosidade plástica e ao limite de fluxo do material [46].
- **Extrusão** (*Extrubility*): Diretamente relacionado à trabalhabilidade, é a capacidade das argamassas de serem extrudadas por um bico filamento contínuos, uniforme e estáveis sem bloquear o sistema [53].
- **Capacidade de construção** (*Builtability*): É capacidade de a argamassa suportar um peso da camada extrudadas e os seguintes sem alterar a sua geometria quanta mais camadas capazes de empilhar sem deformação, maior será sua capacidade de construção, a tensão de escoamento estática do material fornece rigidez inicial, essa rigidez está relacionada à capacidade de retenção da forma após a extrusão, necessária antes mesmo do desenvolvimento estrutural do material[53]
- **Retenção de forma** (*Shape Retention*): é a capacidade de manter a geometria das camadas após a extrusão; [30]
- **Tempo aberto** (*Open time*): que também e chamada de janela imprimível, é o tempo que o material deve ter a trabalhabilidade necessária para ser empilhado em camadas sem deformações [51].
- **Adesão entre camadas** (*Interlayer Adhesion*): É a capacidade que o material tem de se relacionar com as camadas subsequentes; [30]

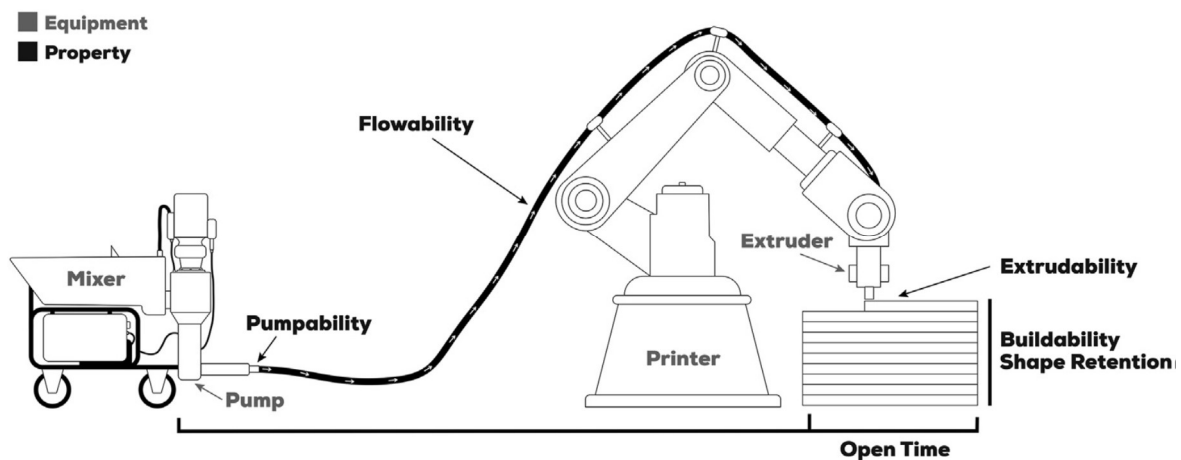


Imagem 32 - Propriedades e equipamentos necessários para 3DP com extrusão de material [44]

No quadro 5 apresentam-se algumas argamassas utilizadas para impressão disponíveis na literatura. Verifica-se que, em geral, são materiais que atingem as resistências relativamente elevadas desde o primeiro instante, os materiais finos são construídos por uma mistura de cimento e outras adições pozolânicas, e que para além do uso de superplastificante é frequente o recurso a adjuvantes retardadores [54].

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

Quadro 5 - Características de argamassas de impressão [41].

Nos últimos anos, houve um aumento significativo no desenvolvimento de tecnologias de impressão para argamassas e betão no que diz respeito a redução de pegada de carbono na IC, para que isso se torna se possível houve uma busca por agregados, clínquer e ligantes alternativos para argamassa com objetivo de aproveitar subprodutos e resíduos industriais como matérias-primas, em vez de utilizar apenas recursos naturais, como exemplo da argamassa criada pela *Cybe Construction - Cybe Mortar*.

É um material de alto desempenho e durabilidade em todos os ambientes. A argamassa endurece em 3 minutos e atinge a resistência estrutural em apenas 1 hora, isso permite um processo de impressão rápido e eficiente, redução de custos e resultados sustentáveis, contém baixas quantidades de cloreto de sulfato que é menos prejudicial para o meio ambiente através desta argamassa foi possível reduzir 32% de CO₂ [55].



Imagem 33 – CyBe Mortar [50].

Em colaboração com a CEMEX, a empresa COBOD desenvolveu a D-fab, uma solução de materiais para impressão 3D, com aplicação universal, a D-fab é uma opção mais sustentável, contribuindo para redução das emissões de dióxido de carbono, promovendo também a sustentabilidade ambiental, na imagem abaixo ilustra essa redução na pegada de CO₂ entre a D-fab e outras argamassas imprimíveis [56].

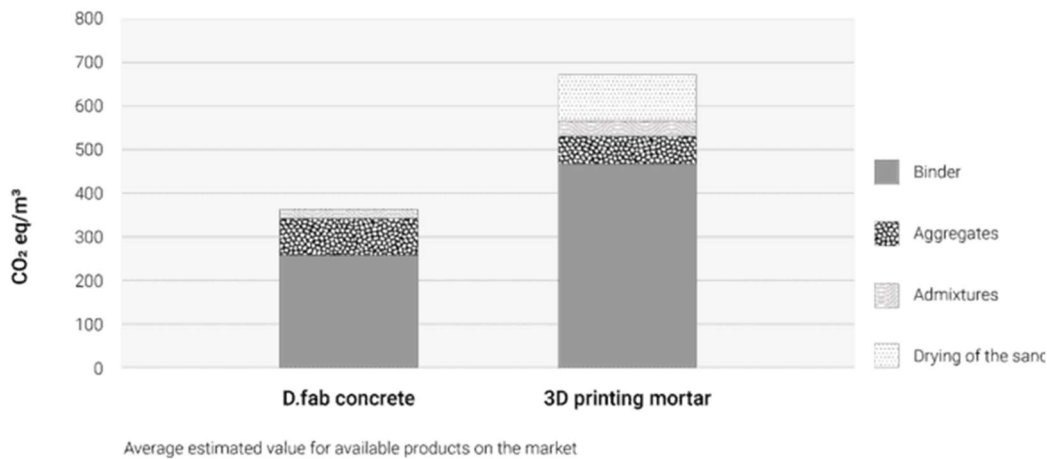


Imagem 34 - Comparativo da pegada de Co2 entre argamassas de D-Fab e outros tipos de argamassas [56].

Como mencionado anteriormente, vários centros de pesquisas tem feito experimentos com adições minerais para minimizar o teor de cimento Portland (PC), no entanto, outros constituintes da argamassa, como os agregados, também precisam ser substituídos por soluções mais sustentáveis, respeitando os conceitos da economia circular [46],[57].

Recentemente apresentaram argamassas produzidas com agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados, substituindo a areia natural na impressão de um empreendimento de 2,5x2,5x3 m. A “areia” reciclada foi obtida através da tributação e peneiração de resíduos de argamassa. Os autores mencionaram que matérias recicladas podem ser vantajosas para um material de impressão 3D, melhorando a retenção de forma das argamassas sem diminuir as propriedades mecânicas.

Os resultados mostraram que a substituição de 25% da areia natural por areia reciclada não resulta em desvantagem para o material produzido (composto por areia de rio graduada, areia reciclada, PC, meticelulose, hidroxipropil - HPMC) [30].

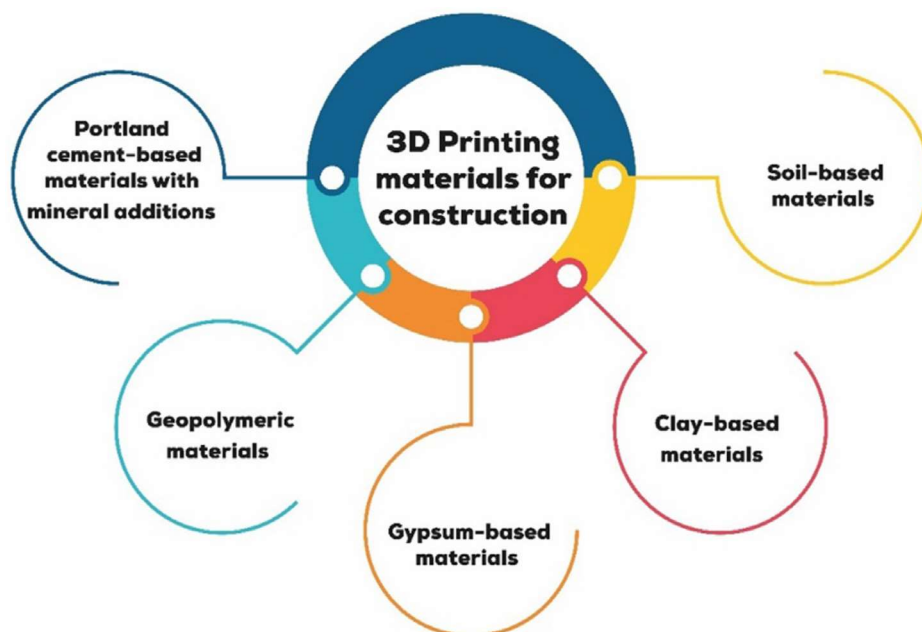


Imagem 35 - Abordagens seguidas pela literatura no desenvolvimento de materiais 3DP mais sustentáveis [30].

- METAIS

Há alguns anos, a tecnologia de impressão com metais estava limitada a componentes de pequenas escalas, como nó de fachadas e conexões entre peças. No entanto, recentemente uma *start-up* holandesa denominada por MX3D, fundada pelo jovem ‘designer’ Joris Laarman, tem se dedicado à exploração dos potenciais dos processos de fabricação aditiva, em particular a tecnologia de sinterização a ‘laser’ de metal (DMLS) [38],[58].

Por meio desta tecnologia, a MX3D foi capaz de fabricar a ponte de metal em camadas sucessivas, depositando material derretido por um ‘laser’ controlando precisamente. Este processo permite criar uma estrutura robusta durável, ao mesmo tempo, em que oferece flexibilidade de ‘design’ e a possibilidade de incorporar detalhes complexos [58].

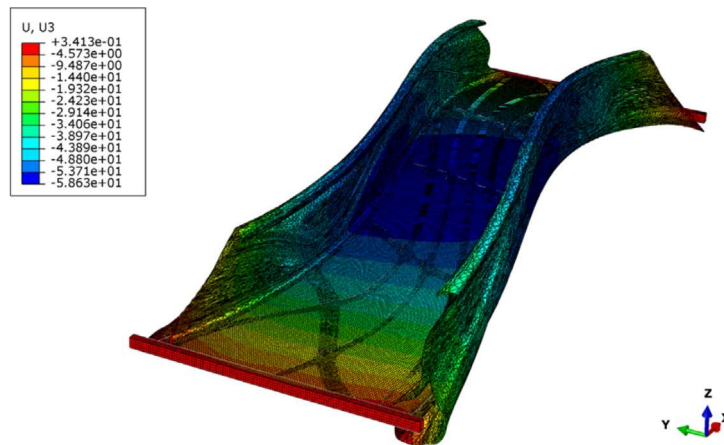


Imagem 36 – Simulação gráfica da ponte projetada pela empresa MX3D [58].

A ponte metálica em Amsterdão representa um marco significativo no avanço da impressão com uso de metais e abre maior escala e complexidade. Além disso, demonstra como a combinação entre a criatividade, inovação tecnológica e colaboração entre diferentes sectores pode impulsionar o progresso na indústria ver imagem 39 e 40.

No entanto, o uso do metal permite formas estruturais altamente otimizadas que são bastante onerosos e demorados ou mesmo impossível de produzir tradicionalmente esses elementos podem ser combinados com secções estruturais para formar estruturas híbridas [38].



Imagem 37 – Ponte impressa em exposição [53].

• GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros têm despertado grande interesse e são considerados uma solução promissora para substituir materiais baseados em cimento Portland (PC). Além de suas vantagens em termos de impacto ambiental, esses materiais são conhecidos por gerar 80% menos CO₂ do que o cimento Portland, o que representa um avanço significativo na busca por alternativas mais sustentáveis na construção civil [30], [59].

No entanto, apesar das suas promissoras características, as técnicas de fabricação aditiva de polímeros são atualmente os métodos de manufatura mais comuns utilizados. Essas técnicas ganharam popularidade devido ao baixo custo e ampla disponibilidade de equipamentos de impressão 3D. Contudo, para a construção de edifícios, os materiais poliméricos ainda são pouco utilizados, principalmente devido a preocupações com a estabilidade estrutural e segurança contra incêndios. Os desenvolvedores de construção com polímeros precisam enfrentar o desafio de realizar constantemente vários testes e ensaios para avaliar as características estruturais desses materiais. Isso se deve à necessidade de garantir que esses materiais sejam seguros e capazes de resistir às forças e demandas que os edifícios enfrentam durante a sua vida útil [30],[36].

Um exemplo pioneiro nesse campo é o primeiro projeto da Start-up *DUS Architects*, uma casa urbana com dimensões de 8 m² por 35 m³, conforme mostrado na Imagem 41 [60].

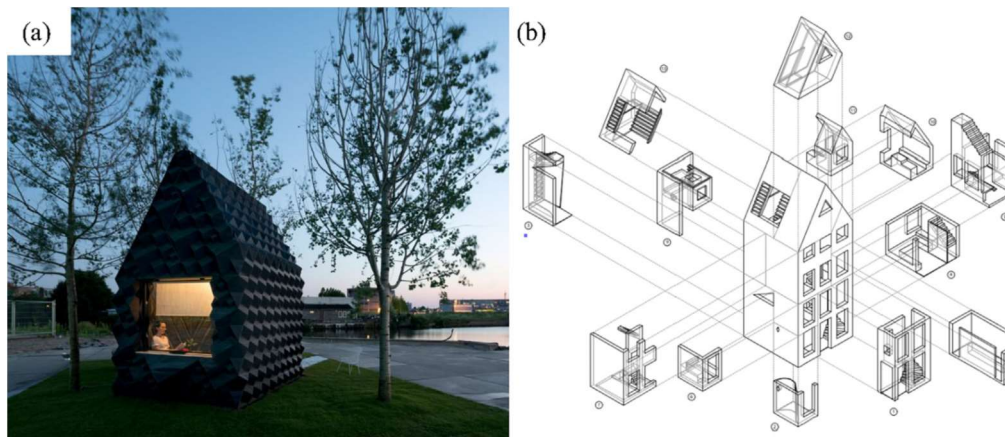


Imagem 38 - Primeiro projeto da Start-up *DUS Architects*, denominada por *Canal House* com a dimensão de 8 m² por 35 m³ [60].

Atualmente, a *Canal House*, imagem 38, localizada em Amsterdão, representa o maior exemplo de construção existente com o uso de geopolímeros. Essa construção é um marco importante na demonstração da viabilidade desses materiais na arquitetura contemporânea.

Em suma, os geopolímeros representam uma abordagem promissora para reduzir o impacto ambiental da indústria da construção em comparação com o cimento Portland. Embora haja desafios a serem superados, o potencial desses materiais na construção de edifícios sustentáveis e inovadores torna o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento uma prioridade para a busca de um futuro mais consciente e ecologicamente equilibrado [61].

Quadro 5 - Resumo das principais propriedades dos materiais impressos em 3D apresentados anteriormente;

Material	Porque esta sendo usado na Impressão 3D	Propriedades de Fresco	Performance Mecânica	Textura	Possibilidades de cores
Material á base do PC; [62]	Habilita o desenvolvimento de alta performance materiais para 3DP.	Eles podem ser otimizados usando misturas químicas. Quando resíduos de vidro usados e rejeitos de cobre como agrega o consuntibilidade e retenção forma pode ser diminuído.	Pode ser melhorado com uso de misturas químicas.	Eles permitem um grande tom cinza texturas, que podem principalmente texturas, que podem ser controladas pela granulometria dos agregados e pelo bico geometria.	Liberdade de embora, quando usado PC branco é possível alcançar diversas cores.
Materiais geopolímeros; [61]	Eles geram 80% menos CO2 que o PC	Assim como no PC materiais " <i>nanoclays</i> " podem ser usados para otimizar forma retenção de forma e capacidade de construção. Eles não necessitam de aceleradores de cura para desenvolver resistência rápida.	Eles alcançam melhor desempenho mecânico e durabilidade do que materiais de PC.	Permitem uma grande liberdade de espessuras, que podem ser controladas pela granulometria dos agregados e pela granulometria do bico.	Escalas de Cinzas
À base de solo e argila materiais; [63]	São materiais de baixo custo e com baixo impacto ambiental	Biopolímeros como alginato podem ser usados para melhorar a retenção de forma.	O material alcança um desempenho mecânico semelhante ao material convencional de terra	São mais suaves quando impressos com um bocal circular	Castanhos e amarelos
Materiais à base de gesso; [64]	São materiais de baixo custo, com isolamento acústico e leveza, além de baixo impacto ambiental.	Policarboxilatos são necessários para retardar o tempo de endurecimento, caso contrário, obstruções podem ocorrer durante a impressão	Menores do que materiais baseados em PC	Eles podem ser usinados para melhorar o acabamento final.	Escalas de cinzas

Fonte: Adaptado de [30].

3.5 EXEMPLO DE PROJETOS FEITOS COM BASE EM 3DPC

3.5.1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de alcançar melhor compreensão do atual panorama da impressão 3D na IC em geral em todo o mundo, é fundamental analisar de modo mais detalhado algumas obras concebidas e realizadas recentemente em vários locais e climas com finalidade de alcançar conclusões mais precisas e elucidar fatores comparativos.

Considerada a dificuldade de encontrar bibliografia de qualidade que pudesse sustentar uma análise tecnológica suficientemente desenvolvida, selecionaram-se os seguintes exemplos:

- The BOD – Copenhagen – COBOB;
- Gaia – WASP;
- Apis Cor 3D – WASP;
- House 1.0 - Grupo 3DPC/COBOD;
- Robust Villa - CyBe Construction;

3.5.1.1 METODOLOGIA

A metodologia de estudo do texto é predominantemente descritiva, concentrando-se nas informações técnicas relacionadas à construção de edifícios impressos em 3D. Ele analisa seis projetos distintos: The BOD e House 1.0, ambos impressos pela COBOD em Copenhaga, Dinamarca; Gaia House - WASP na Itália; The house - Apis Cor em Stupino, Rússia; e Robust Villa - CyBe Construction em Curaçao.

Os principais pontos abordados na metodologia são:

Descrição detalhada dos projetos: Cada projeto de construção em 3D é minuciosamente descrito, incluindo informações sobre fundamentos, estabilidade estrutural, instalações, revestimentos, acabamentos, processos construtivos, custos e prazos. Essa abordagem fornece intuições sobre o planejamento e execução de cada projeto.

Análise das tecnologias utilizadas: O texto explora as tecnologias empregues em cada projeto, incluindo máquinas de impressão 3D, materiais, velocidade de impressão e possibilidades de autonomização.

Comparação entre projetos: O texto realiza uma comparação entre os projetos, destacando as suas semelhanças e diferenças, essa análise comparativa proporciona intuições para a comparação das tecnologias de construção projeto de estudo de caso.

Em resumo, a metodologia adotada no texto combina descrições técnicas, análise comparativa e o uso de fontes visuais para apresentar informações detalhadas sobre os projetos de construção em 3D feitas por diferentes centros de pesquisa em várias partes do mundo. Essa abordagem permitirá uma análise mais completa para comparação da construção corrente e a construção por 3DP.

3.5.2 THE BOD – COBOD

A primeira construção impressa em território europeu foi o edifício “The BOD”, localizado em Copenhaga, capital da Dinamarca. Construído em 2017, o edifício foi concebido pela empresa COBOD para ser um escritório que também atua para hospedagem, com menos de 50 m², ver figura abaixo. Decorridos 2 anos, a empresa optou por recriar esta construção, recorrendo a tecnologias mais sofisticadas, ver informação abaixo sobre a nova máquina (The BOD2) [65].



Imagem 39 - The Bod [65]

- FUNDAÇÕES

Há pouca informação a respeito das fundações deste edifício, mas o que se sabe a respeito das mesmas é que as fundações não apresentam formato retilíneo, o que é diferente da maioria das construções, e dificulta assim a impressão 3D.

Embora seja possível a criação de sapatas com formatos curvilíneos, é financeiramente mais custoso e apresenta uma maior dificuldade de execução, quando as fundações são executadas de modo tradicional. Por isso, o edifício *The BOD* não apenas apresenta as paredes feitas de forma impressa, mas também parte da sua fundação [65],[32].

- ESTABILIDADE ESTRUTURAL

O edifício *The BOD* não possui qualquer parede que apresente formato reto, pelo que é de facto um edifício feito exclusivamente com paredes curvas. Além disso, foi possível notar que também foram utilizados reforços no interior das paredes (contudo não foi possível encontrar qualquer especificação detalhada sobre esses reforços [66].

Ainda sobre reforços e fibras, ambos foram usados na impressão do prédio *The BOD* em 2017. As chamadas fibras *crackstop* eram parte integrante da mistura de betão e, como parte do edifício, colunas também foram impressas em 3D, onde varões de reforço foram adicionados manualmente pelos trabalhadores da COBOD (não se sabe a percentagem de esforço complementar oferecida pelos varões) e, em seguida, eles ficaram integrados no betão impresso, ver figura 43.



Imagem 40 - Execução da estrutura [65]

- **INSTALAÇÃO, REVESTIMENTO E ACABAMENTOS**

Não foram encontradas quaisquer informações detalhadas a respeito de instalações, revestimentos e acabamentos do edifício. Contudo, ao basear-se nos conteúdos mediáticos disponibilizados pela COBOD sobre esta construção, pode-se deduzir que foi utilizada argamassa no lado externo, sem adicionar pintura.

- **PROCESSO CONSTRUTIVO**

Como o processo de criação da estrutura impressa de um edifício 3D requer baixa mão-de-obra (normalmente 2 trabalhadores: 1 a operar o aparelho CC e outro a cuidar do gerenciamento de material), torna-se necessário analisar o modo como a máquina funciona, lembrando-se que as outras etapas para finalização do edifício requerem mão-de-obra complementar, fator esse que não deve ser esquecido [67].

Batizada de BOD2, a impressora 3D da COBOD é uma impressora do tipo pórtico, e foi projetada para permitir a impressão no local de uma vasta gama de projetos, incluindo edifícios inteiros com vários pisos [68].

Considerando o seu design modular, esta impressora pode ser movida para cima e para baixo para executar toda a estrutura, desde pequenos componentes pré-fabricados de betão, até à impressão no local de casas, edifícios de escritórios maiores, museus, escolas, armazéns, entre outros, em até 3 andares ($R/C + 2$), ver imagem 41.

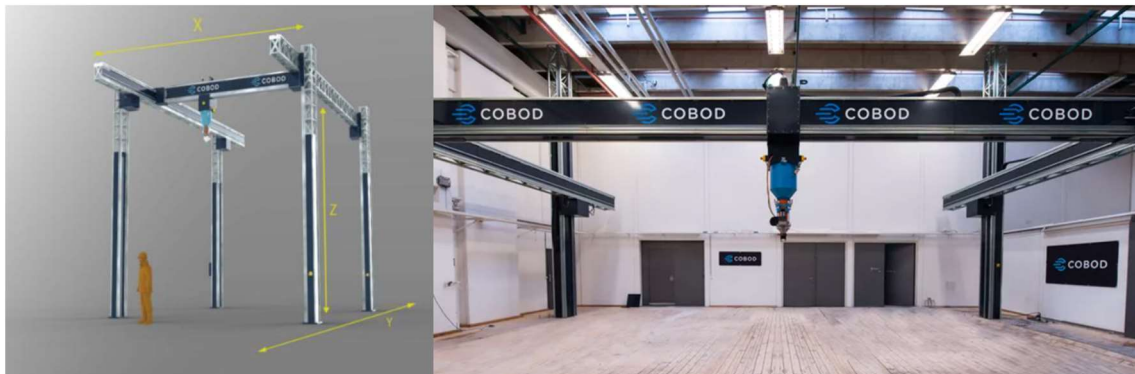


Imagem 41 - Sistema de pórtico (gantry) da empresa COBOD [65].

Segundo o fabricante, esta impressora funciona por meio de módulos, os quais podem ser unidos de forma a cobrir uma maior área de atuação. Embora não haja limitação de módulos no quesito comprimento, há limitação de até 4 módulos na vertical e 6 módulos na horizontal, cada um deles com 2,5 metros, ver mais detalhes na imagem 42.

	Width (X-axis) <i>Printing area</i>	Length (Y-axis) <i>Printing Area</i>	Height (Z-axis) <i>Printing Area</i>
Minimum size	2 meter (2.5 meter)	2 meter (2.5 meter)	0.6 meter (2.5 meter)
Maximum size	14.5 meter (15 meter)	No limit	8.1 meter (10 meter) + height of any concrete installation feet used (page 10)

Imagem 42 - área de atuação das impressoras [61].

A BOD2 foi inicialmente projetada para movimentar o cabeçal à velocidade máxima de 1 m/s. Em 2020, a velocidade máxima utilizada para longos períodos de impressão varia na faixa de 0,4-0,5 m/s. Dependendo da complexidade do material que está a ser impresso, a velocidade pode aumentar ou reduzir [32].

- O processo de instalação demanda entre 4 - 6 horas (quando empregando bases de concreto para a sustentação da impressora);
- O intervalo para a limpeza não foi claramente definido pela companhia.

Existem duas alternativas para a instalação da impressora. As colunas do eixo Z podem ser fixadas ao solo por meio de parafusos ou montadas sobre quatro pedestais de concreto projetados para instalação. Estes pedestais são posicionados sobre a base ou terreno, elevando a impressora a cerca de um metro de altura acima do solo. Isso, por sua vez, amplia a altura máxima de impressão da máquina. As bases dos quatro pilares de suporte dos equipamentos de impressão não são fornecidas juntamente com a impressora, uma vez que precisam ser construídas no local onde a impressora estará em operação [69],[32].

O deslocamento individual dos blocos dos aparelhos permite montar em um novo local em 4-6 horas, com a desmontagem levando 2-3 horas. A impressora BOD2 possui uma câmara de substância sobre o bocal, permitindo controlar a liberação precisa de materiais e interromper a impressão, algo raro em impressoras 3D robóticas. Isso é importante para criar áreas vazias para portas e janelas. A velocidade de liberação de material se ajusta à velocidade de impressão, simplificando os ajustes para o operador [67],[69].

O funil de material é equipado com um sensor de nível do material, e pode ser conectado digitalmente à bomba e misturador, onde toda a alimentação de materiais para a impressora é digital e controlada automaticamente. Recorrendo a esse funil, o fluxo de materiais para o cabeçote de impressão pode ocorrer sem o envolvimento dos operadores. O material é alimentado para o funil na cabeça de impressão por meio de uma mangueira de betão (tamanho típico de $\varnothing 50$ mm), que é conectado à bomba que bombeia o betão fluido e antes ao sistema de mistura [32].

O BOD2 tem duas *webcams* montadas acima do cabeçote de impressão. Ambas são voltadas para a camada impressa atualmente, de modo que o operador tenha uma visão geral completa do processo de impressão, mesmo quando estiver a imprimir paredes mais altas e longe de onde o operador está localizado. As câmaras funcionam como uma ferramenta de garantia de qualidade, de forma que o operador possa verificar a qualidade da impressão e gravar um vídeo da impressão, se necessário. Na imagem 43 é ilustrado podem encontrar-se as especificações da casa BOD2[69], [70].

Max printing length:	No limit
Max printing width:	14.6 m
Max printing height:	8.1 m + height of concrete feet on to which the printer can be mounted
Max printing speed:	Up to 1000 mm/s (1 meter/s)
Layer height:	5-30 mm
Layer width:	30-300 mm
Movement system:	Servo
Material flow:	Up to 3,6 m ³ /hour at 1000 mm/s speed (for a 5cm wide and 2 cm height print)
Max aggregate size:	10 mm
Printer setup time:	4-6 hours
Printer takedown time:	2-3 hours
Manning:	2 operators
Connection:	Wifi or LAN
Interface:	Web client (through browsers like Chrome or Safari)
Slicer software:	COBOD Slice (Windows, MacOS), Third party slicers
Power supply:	32 A, 400 V, 3 phase

Imagem 43 – Especificações da Impressora [67].

Ao abastecer todo o sistema de stock de materiais em um silo junto à impressora, de forma manual, o misturador / bomba pode ser colocado sob o silo. Dessa forma, o material seco do silo é enviado automaticamente para o misturador, conforme necessário. O misturador / bomba então adiciona água e aditivos ao betão para manter a bomba sempre cheia. A bomba e o fluxo de materiais para a impressora são controlados pela impressora em si [32], [69].

Ao completar o abastecimento do sistema de armazenamento de materiais num silo adjacente à impressora, de forma manual, é viável posicionar o misturador/bomba sob o silo. Dessa forma, o material seco presente no silo é automaticamente encaminhado para o misturador, sempre que necessário. O misturador/bomba, por sua vez, adiciona água e aditivos à argamassa, assegurando um fluxo constante. A regulação da bomba e do fluxo de materiais para a impressora é conduzida pela própria impressora [69], [70].

- **PRAZOS E CUSTOS**

A respeito de prazos, sabe-se que na primeira construção, a COBOD levou 22 dias para sua finalização. Já anos mais tarde, com aprimoramento das tecnologias e processos, esse tempo encurtou para somente 3 dias, na BOD2 [67].

A receita utilizada na fabricação do betão pode ser encontrada no quadro abaixo. Ela foi usada pela COBOD em 2017, na construção do *The BOD*. Embora a Dinamarca seja um país com custo de materiais elevado, o valor final do betão foi de somente cerca de 90 euros por tonelada (a empresa não divulgou valores gastos com equipamentos e mão-de-obra) ver figura 44.

Material	Quantity [ton]	Price DKK	Price EUR	Percentages by weight
Cement	6.12 ton	10,374 DKK	1,391 EUR	32 %
0-2mm sand	3.50 ton	595 DKK	80 EUR	18 %
0-4mm gravel (0-8mm)	3.50 ton	637 DKK	85 EUR	18 %
0-4mm recycled roofing tiles (0-8mm)	4.38 ton	525 DKK	70 EUR	23 %
Water	1.66 ton	62 DKK	8 EUR	9 %
Glenium sky 631 (superplasticizer)	0.04 ton	191 DKK	26 EUR	-0 %
Crackstop fibers	0.02 ton	1,038 DKK	139 EUR	-0 %
Total	19.22 ton	13,422 DKK	1,799 EUR	100 %

Imagem 44 – Tabela do custo de material (2017) [67].

A produção de cada camada do projeto levou cerca de 15 minutos e, portanto, não foi necessário adicionar aditivos aceleradores extra na composição do betão. O mesmo não poderia ser feito caso a obra fosse de menores dimensões, o que requereria o uso de tais aditivos aceleradores para que o betão recebesse devidamente uma nova camada por cima.

A resistência à compressão deste betão foi testada a 52 MPa (6500 PSI), em especial por causa do teor de cimento relativamente alto. Neste projeto específico, 23% do material foi substituído por telhas recicladas e trituradas, que aumentaram as capacidades de fluxo do sistema e provaram que os materiais reciclados podem ser usados na produção de edifícios impressos em 3D como “carga” adicionada ao betão fluído a bombar o que aumenta a trabalhabilidade e reduz o *slump* da mistura bombada. Contudo, o material reciclado utilizado no projeto poderia ser facilmente substituído por agregado britado tipo cascalho regular de tamanho de grão semelhante [32].

3.5.3 GAIA HOUSE - WASP

O estúdio italiano de impressão 3D WASP (*world's advanced saving project*) em colaboração com a empresa rice house, produziu no ano de 2018 um protótipo de residência em larga escala a partir de solo, produtos de arroz e cal hidráulica. O protótipo conta com aproximadamente 30 metros quadrados, o projeto foi executado em 10 dias na cidade de Massa Lombarda, na região de Emilia – Romagna. O projeto chamado de Gaia House, busca estimular a produção em larga escala de estruturas biodegradáveis e estruturalmente eficientes, para a fabricação do protótipo residencial intitulada “*Crane WASP*”, ver imagem 45 [71].



Imagem 45- Processo de execução de obra da casa Gaia e colocação de fibras de arroz [63]

- **FUNDAÇÕES**

Uma ênfase significativa nesse tipo de construção foi dedicada à fundação, que desempenha um papel crucial na prevenção de infiltrações de água do solo e na mitigação de possíveis afundamentos desiguais do terreno subjacente. Para a fundação, foi empregue a tecnologia convencional, na qual sapatas foram posicionadas ao redor de todo o perímetro do edifício, seguidas pela criação de uma laje de fundação[72], conforme ilustrado na imagem 47.



Imagem 47 - Colocação de armaduras junto às fundações – Gaia [72]

- COBERTURA

A cobertura de madeira lamelada colada (MLC) é suportada por uma estrutura de pilares, também em madeira laminada, embutida na fundação, o que garante a usabilidade dos espaços com total segurança como ilustrada na imagem 48 [73].

O edifício se ergue a partir da fundação de betão com formato circular, a contar com um projeto computacional desenvolvido pela equipe para reduzir a quantidade total de materiais, enquanto imprime variação geométrica em toda a fachada, ver figura abaixo. Graças à impressão 3D, o processo permite minimizar a quantidade de betão nas fundações, mas também de forma a obedecer às normas construtivas.

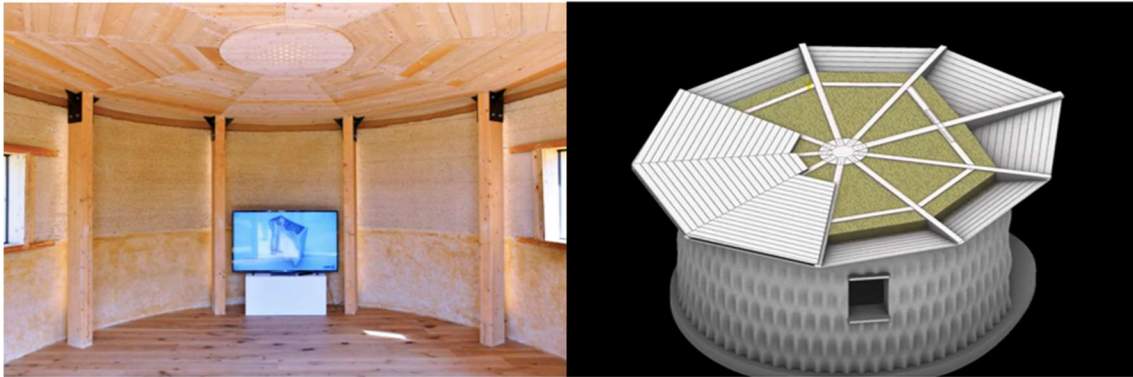


Imagem 48 -Vista interior da habitação e cobertura em MLC [71],[70]

- INSTALAÇÕES

Dentre as principais instalações deste edifício, um tubo estrategicamente posicionado conecta a parte exterior à área central de Gaia, objetivando a entrada de ventilação natural para aperfeiçoar o conforto térmico dos ocupantes. A investigação revela que o edifício não dispõe de sistema de aquecimento ou arrefecimento convencionais, contando, ao invés disso, com um eficiente isolamento térmico nas suas paredes externas.

A análise detalhada da configuração das paredes revela um projeto arquitetónico inteligente, permitindo a remoção eficiente do ar frio e do ar exalado mediante conexões presentes no pano interno das paredes. As informações disponíveis sobre as instalações do edifício foram obtidas por meio de fontes limitadas, uma vez que a entidade WASP.

Os resultados indicam que a abordagem sustentável adotada no edifício Gaia representa uma expressão concreta de como a arquitetura pode ser alinhada aos princípios da sustentabilidade e respeito ao meio ambiente. A ausência de sistemas convencionais de aquecimento e arrefecimento em favor do uso de recursos naturais, como a ventilação natural e o isolamento térmico, demonstra uma visão vanguardista relativamente à eficiência energética e ao conforto ambiental ver imagem 49 e 50 [71],[74].

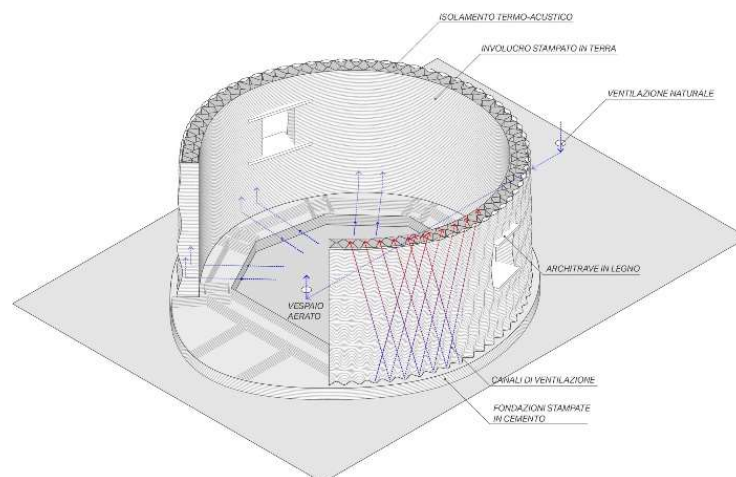


Imagem 49 - Sistema de ventilação das paredes através das cavidades das paredes[71] .



Imagem 50 - Corte (Tubagem para ventilação) [41].

- **REVESTIMENTOS E ACABAMENTOS**

Cascas de arroz foram despejadas nas cavidades para isolar a estrutura. Foram utilizadas padieiras de madeira para as janelas e portas, ver imagem 51, também para permitir que fossem introduzidas novas camadas de argamassa até alcançar a cota da cobertura [73].

O edifício não necessita de aquecimento nem de sistema de arrefecimento, pois mantém uma temperatura amena e confortável tanto no inverno como no verão.



Imagem 51 – Inserção de cascas de arroz nas cavidades das paredes e Construção de vãos com reforço estrutural em pranchas de madeira [71].

O projeto se beneficia da captura passiva da energia solar, graças à sua orientação a sudoeste. Uma ampla janela foi estrategicamente posicionada para otimizar a entrada de luz natural. No entanto, o foco principal recai na estrutura, tanto do telhado quanto da betonilha. O telhado é construído com madeira, isolamento em cal e casca de arroz (ver a imagem 51), enquanto a betonilha é composta de cal e casca de arroz.

Além disso, a parede monolítica, criada através da impressão 3D, passou por um processo interno de acabamento, sendo alisada e tratada com óleos de linhaça [30] para proporcionar maior durabilidade e estética [32].

- **CUSTO E PRAZOS**

A construção levou 10 dias para aplicação de todo material impresso em 3D, cobrindo uma área total de parede de 30m² com espessura de 40 cm. O desempenho térmico superou as expectativas do projeto e mostrou-se muito satisfatório. Além disso, o custo de aquisição do material foi surpreendentemente baixo, totalizando apenas 900 Euros [71].

3.5.4 ROBUST VILLA – CYBE CONSTRUCTION



Imagem 52 – Exterior Robust Villa [75]

A CyBe Construction fez parceria com a *Betonindustrie Brievengat* para construir o primeiro edifício impresso 3D em argamassa no Caribe para combater a crise de escassez de moradias em Curaçao. Com 80 anos de experiência no mercado de produtos de argamassa, o objetivo da *Betonindustrie Brievengat* era tornar-se líder no campo da inovação da construção no Caribe e tornar possível uma vida moderna e acessível para a população de Curaçao. Essa colaboração fez com que criassem um protótipo de 104 m², ver imagem 52. A proposta comercial da *Betonindustrie Brievengat* propõe uma moradia de 1 ou 2 quartos [75],[76].

- ESTRUCTURA

As fundações foram executadas com recurso a construção tradicional com a combinação dos esforços dos trabalhadores da *Betonindustrie Brievengat* e CyBe construction, a fundação foi feita usando a tecnologia de ensoleiramento geral também conhecido como “laje de fundação” comum ente utilizada em construções de habitações de pequeno porte, ver imagem 56 [75], [77].



Imagem 53 – Impressão das paredes off-site execução da fundação em tecnologia convencional [78]

Como forma de diminuir exponencialmente o prazo de execução as paredes foram executadas fora do local de obra com ajuda do braço robótico desenvolvido pela Cybe Construction, ver imagem 53, onde as paredes estão sendo executadas em camadas sucessivas para formar as paredes, aproximadamente uma pessoa operava o aparelho enquanto outras duas se encarregavam de instalar a armadura e fazer o controlo de qualidade para garantir que a estrutura esteja de acordo com as especificações do projeto para que não haja defeitos ou falhas [77].

Posteriormente foram transportadas em um caminhão para o local de obra, devidamente codificados e posteriormente colocados no pavimento, ver imagem 57 e 58 [76].

Não existe muita informação na literatura relativas a montagem das paredes fixadas no pavimento e a estrutura por detrás dessa montagem, e também não há informação de como é feito a impermeabilização das paredes contra o pavimento.



Imagem 54- Assemblagem das paredes com ajuda de uma grua [96].

Neste projeto, optou-se pelos usos de um sistema estrutural de laje maciça em betão armado (in-situ) ver imagem 54, utilizando betão moldado tanto na cobertura e tanto na fundação. Esta escolha implicou despesas significativas devido à necessidade de subcontratar mão-de-obra especializada para execução das armaduras, cofragem e também trabalhos de pedreiro para tarefas como vibração e nivelamento do betão. Após a conclusão destes procedimentos, é importante salientar que a laje maciça em betão requer um período de cura de 28 dias, com uso de cimbros, o que inevitavelmente acarreta custos adicionais com aluguer de equipamentos como aquisição de escoras e cofragem [76].



Imagem 55 - Execução da cobertura [79]



Imagem 56 - Execução de infraestruturas[75]

- **INFRAESTRUTURAS**

Na construção fora do local (*off-site*) de paredes impressas em 3D, a instalação das tubagens ocorre numa fase posterior, após a montagem das paredes no local de construção final. A impressão 3D das paredes normalmente não inclui a incorporação direta das tubagens, como canalizações ou ductos elétricos, durante o processo de impressão.

Após a montagem das paredes impressas em 3D, os profissionais da construção abrem caneias nas paredes para a instalação das tubagens, ver imagem 56, estes trabalhos são realizados com ferramentas convencionais de corte de alvenaria ou até equipamentos de corte a laser.

Uma vez que os dutos são criados, as tubagens são inseridas e fixadas adequadamente.

No caso das tubagens de água e esgoto, por exemplo, elas são conectadas aos pontos de acesso apropriados para garantir às tubagens elétricas, os cabos e fios elétricos são colocados através

dos canais fixados nos pontos adequados, permitindo a instalação posterior de interruptores, tomadas e luminárias [79].

- **PRAZOS E CUSTOS**

O custo do material de impressão depende da estratégia adotada e tem um custo de 525 dólares por toneladas (1.000 kg) nos EUA. No entanto, para este projeto, adotou -se uma abordagem mais econômica optando pela produção local do CyBe MORTAR, o que pode resultar em redução de custos significativa.

Uma das vantagens dessa abordagem segundo a CyBe, é de poder ajustar a mistura do CyBe Mortar de acordo com as necessidades específicas do projeto, o que pode influenciar no preço final do material produzido localmente. Nesse sentido a empresa criou um método detalhado conhecido por “*method statement*”, para guiar a produção local de materiais.

Vale destacar que cada paleta de CyBe MORTAR pesa 1200 kg, e essa quantidade nos permite otimizar o processo de produção logística de transporte. Embora o custo exato da produção local ainda não seja conhecido, acredita -se que esta estratégia possa ser uma solução vantajosa para reduzir despesas e tornar o projeto mais viável economicamente, ver imagem 57.

A expectativa é que, ao produzir o material localmente, a CyBe possa alcançar resultados favoráveis em termos de custo benefícios e contribuir para o sucesso geral de vários projetos [80].

Material requirements expected	pallets (1200 kg per pallet)	tons	Cost per ton		
Material usage (CyBe Mortar)	20	24.0	\$525,-*		\$12.600,-*

Material

Imagem 57 - Quantidade e custo de material [80], [81]

Working hours expected	operators	hours	total	Cost (per hour)	Cost per unit
Working hours	2	40	80	\$40	\$3.200,-

Labor cost depend on local cost

Imagem 58 - Custo de mão-de-obra [80], [81]

Foram, no total, efetuadas 40 horas de impressão de paredes, com um custo global de projeto a atingir os 23.000 dólares, acrescido dos custos adicionais associados à execução do projeto, transporte e consumíveis (equipamentos), ver imagem 53.

					\$7.200,-	D & E
Material requirements expected	pallets (1200 kg per pallet)	tons	Cost per ton			
Material usage (CyBe Mortar)	20	24.0	\$525,-*		\$12.600,-*	Material

Additional:

Design & Engineering	\$7.200,-	\$23.000,-	Total cost
Transport material before printing	\$3.500,-		
Consumables	\$630,-		

Consumables: Rotor+Stator, Mixing Iron, Retarder, Hose (15m) with connectors

Imagem 59 - Custo total da construção [80], [81].

3.5.5 THE HOUSE - APIS COR

Em 2016, na cidade russa Stupino, a empresa Apis Cor, especializada em impressão 3D (ver figura abaixo e [20], fabricou seu primeiro edifício impresso, ver figura 60.

Localizada na Rússia, a pequena moradia de 38 m² foi criada em menos de 24 horas e, diferentemente de outros edifícios cujas partes são produzidas separadamente em indústrias e montadas no estaleiro, esta foi produzida totalmente *in situ*. Embora tenha sido efetuada em poucas horas, a expectativa de tempo de vida desta obra é de até 175 anos.

O conceito foi idealizado para que a habitação apresentasse formato de ciclone, ver imagem abaixo, algo que foi considerado simbólico, devido a velocidade com que o projeto foi finalizado [82].



Imagem 60 - Vista exterior e aérea da “The House” [84]

- FUNDAÇÕES

As bases do prédio foram estabelecidas por meio de uma colaboração entre a tecnologia da impressão 3D e a equipe da Apis Cor. Primeiramente, a impressora assumiu a tarefa de criar o perímetro de toda a base do edifício (molduras das sapatas), gradualmente acrescentando novas camadas até alcançar uma determinada altura. Enquanto os contornos eram produzidos, os funcionários inseriam tubos nas sapatas. Embora a companhia não tenha entrado em detalhes quanto à sua utilização, é entendido que esses tubos têm a função de facilitar a circulação de ar e prevenir a formação de condensação, impedindo assim a acumulação de humidade.

Após atingir um patamar específico, estruturas de reforço foram incorporadas ao espaço designado para as fundações e, posteriormente, revestidas com concreto denso (pelos trabalhadores), conforme relatado pela empresa [82].

• ESTRUTURA E MODO DE EXECUÇÃO

Para a execução das paredes impressas o método mais comum de posicionamento de armaduras é a armação horizontal, mais comum quando a construção se baseia em deposição de camada por camada. A colocação de reforço é posicionada entre as camadas repetido as etapas acima, ver imagem 61. A qualidade das paredes impressas permitiu que se desse início ao acabamento final imediatamente, o que reduziu significativamente o custo dos trabalhos de acabamento [62].

A impressora feita pela Apis Cor, diferentemente do aparato tradicional em formato de pórtico, permite que se imprima com liberdade de 360° sem a necessidade de o maquinário deslocar-se horizontalmente. Esse dispositivo com peso de cerca de 2 toneladas, altura variável entre 1,5 m a 3,1 m, e comprimento que variava de 4 m a 8,5 m, funciona também como abastecedor e misturador automático de materiais, o que acaba por agilizar o processo construtivo de impressão, além de deixá-lo mais automático [67],[83].

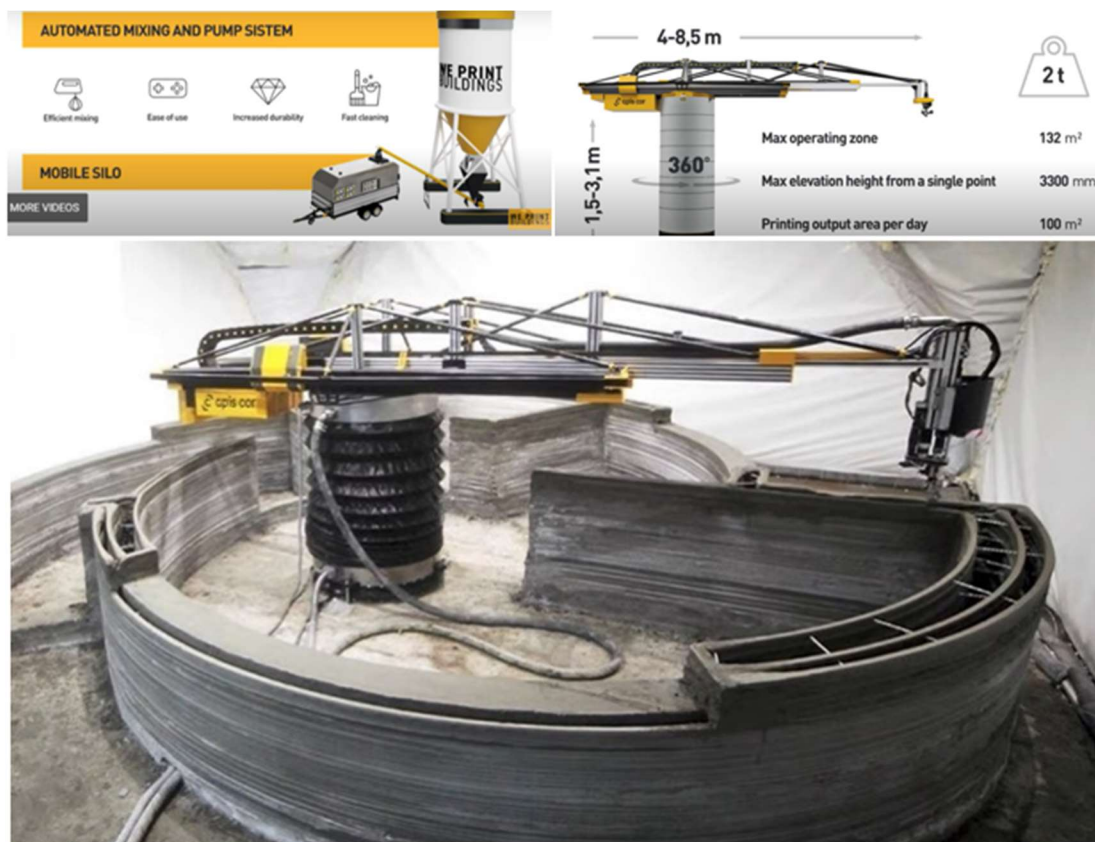


Imagem 61 – Sistema de bombagem e impressora braço robótico Apis Cor [84]

Outro fator que torna essa impressora versátil é o facto de ser compacta e relativamente leve, o que permite ser transportada sem muitas dificuldades por camiões. O processo de instalação local e finalização de preparação leva menos de 1h juntamente com o silo móvel e o sistema de bombagem [68].

Ainda que o equipamento possa ser utilizado a temperaturas tão baixas como -35°C, o mesmo não se aplica à mistura de betão que foi utilizada, uma vez que a temperatura mínima que esta pode suportar no seu estado pastoso é de 5°C. Dado que a construção foi iniciada durante o inverno russo, tornou-se inviável prosseguir com o projeto. No entanto, foi encontrada uma solução simples para contornar este obstáculo. Foi montada uma tenda protetora no local da construção, de modo a possibilitar a obtenção de valores de temperatura mais adequados para a mistura de betão.[85].

Seguindo a estrutura da edificação, o telhado possui uma configuração plana. Apesar de não ser apropriado para áreas com intensa queda de neve, pois requer uma estrutura reforçada e, consequentemente, gastos elevados, o projeto do telhado da casa construída por impressão 3D foi desenvolvido para resistir a grandes acumulações de neve e atender a critérios de longevidade. Seu custo é equiparável aos telhados inclinados frequentemente observados na região[85].

- **REVESTIMENTOS E ACABAMENTOS**

No tocante a isolamento térmico, foram colocados dois tipos de isolantes entre as paredes de betão, como forma de garantir o conforto na habitação. Para algumas paredes, foi utilizado material isolante em pó seco, ver imagem 62, para outras, uma composição de enchimento à base de poliuretano, ver figura abaixo [82].



Imagem 62 - Colocação de janelas [86]

- **PRAZOS E CUSTOS**

Em relação ao custo, o valor total para a construção desta habitação foi de somente 10.134,00 dólares (ano de 2017), correspondente a aproximadamente 275 dólares por metro quadrado. Esse valor engloba todos os trabalhos e materiais para a construção de: fundações, telhado, acabamento interno e externo, isolamento nas paredes, instalação de janelas, pisos e teto suspenso. Como exemplo, uma casa tradicional em formato quadrado, construída a partir de materiais regulares, custa nesta região, cerca de 223 dólares por metro quadrado.

No que tange a questão de prazos, a empresa informou que o tempo para conclusão de todos os trabalhos foi de aproximadamente 24 horas. Segundo a construtora, o uso de impressora 3D para construção de edifícios pode representar uma economia de até 70% para erguer um edifício, comparado com métodos tradicionais que requerem um considerável aumento de mão-de-obra e um maior tempo de execução física dos trabalhos no local [87],[86].

3.5.6 HOUSE 1.0 – GRUPO 3DPC -COBOD

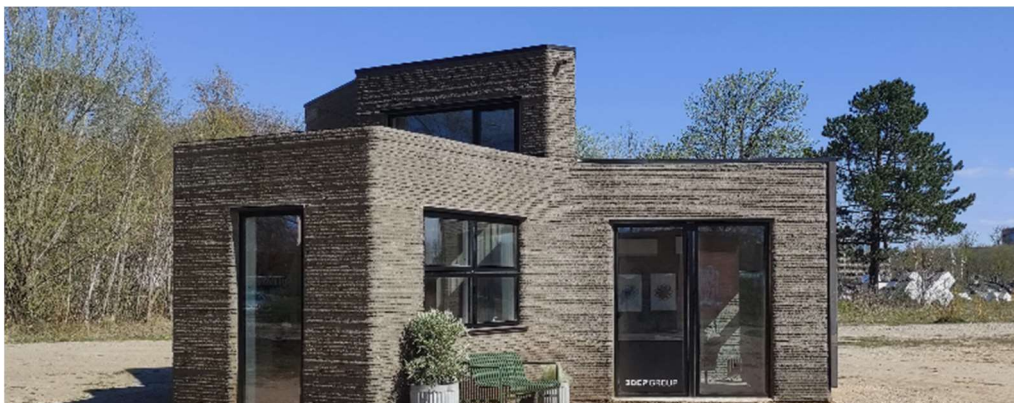


Imagem 63 - Exterior da Casa 1.0 [88]

A casa 1.0 foi construída em 5 semanas, projetada pela start-up 3DPC Group construída na cidade de Holstebro, na Dinamarca. Foi denominada de casa 1.0 por ser a primeira habitação da start-up a ser impressa com recurso a tecnologia por impressão 3D na cidade [88].

Para gerar a casa, A 3DCP usou a impressora gantry BOD2 da COBOD o edifício foi projetado para ser o mais acessível possível abrigoando todas comodidades necessárias para imprimir uma residência de 37 m² [89].

- **FUNDAÇÕES**



Imagem 64 - Execução de betão de limpeza e laje de pavimento [90]

As bases do edifício foram construídas através de uma colaboração entre uma impressora 3D e os funcionários da COBOD. Na imagem 64, é possível ver o processo de extrusão de argamassa para criar o contorno das fundações do edifício. Isso inclui a primeira camada de impressão, que serviu como forma para o piso.

Uma vez que atingido um certo nível de altura, reforços foram adicionados dentro do espaço destinado às fundações e, em seguida, cobertos com concreto. Todas as tarefas adicionais, como a vibração do concreto e o nivelamento da camada de concreto, foram realizadas manualmente, ver imagem 64 [89].

- **ESTRUTURA E MODO DE EXECUÇÃO**

As paredes impressas pelas impressoras da COBOD são normalmente ocas compostas por duas cavidades podendo ser preenchido com isolamento (ou não, dependendo do ambiente, da utilidade do edifício e dos códigos locais) com finalidade de melhorar o desempenho térmico da parede, no caso da parede da habitação 1.0 as paredes foram reforçadas verticalmente com recursos a grampos, como pode ser visto claramente da imagem 65.



Imagem 65 - Execução das paredes e colocação de armaduras [89].

Para a execução de vãos (janelas e portas) foram feitas com recurso de um reforço em vigas pré-fabricadas, possibilitado que sejam feitas mais camadas por cima do vão, ver imagem 66.



Imagem 66 – Montagem de padieira da porta e janela e montagem de cobertura [91].

Para execução da cobertura foram utilizadas pré-laje, a pré-laje é uma estrutura pré-impressas pela e é constituída por betão de alta resistência, armaduras pré-esfoçadas, e enchimento em poliestireno conferindo excelentes propriedades térmicas e acústicas, desta forma com esta solução foram reduzidas os custos e tempo imputados na montagem e desmontagem de cofragem [92].

- **PRAZO E CUSTOS**

Neste projeto a impressora teve um desempenho de impressão uma taxa máxima de 1000 mm por segundo. Desta forma foi possível terminar a construção desta habitação em 5 semanas e a impressora só esteve ativa por 22 horas. Não foram encontradas informações inerentes ao custo desta empreitada [67], [90].

Com o objetivo de fazer uma comparação de cada uma das construções analisadas neste capítulo, que marca o início do estudo de caso e fornecerá apoio mais adiante, foi criado um quadro síntese, ver quadro 6.

Quadro 6 - Resumo das dos empreendimentos apresentados anteriormente.

	Exemplo 1	Exemplo 2	Exemplo 3	Exemplo 4	Exemplo 5
Empresa	COBOD	WASP	Apis Cor	CyBe Constrution	COBOD
Nome	The Bod	Gaia	The House	Robust Villa	House 1.0
Ano	2017	2018	2016	2022	2021
Local	Dinamarca	Itália	Rússia	Curaçao	Dinamarca
Área	50 m ²	30 m ²	38 m ²	106 m ²	38 m ²
Duração	22 dias	10 dias	1 dia	42 h	5 semanas
Custo material	€ 1 800	€ 900	-	\$12600	-
Custo MDO	-	-	-	\$3200	-
Custo Total	-	-	\$ 10134	\$23000	-
Canteiro de Obra	<i>In-site</i>	<i>In-site</i>	<i>in-situ</i>	<i>Off-site/In-site</i>	<i>off-site / In-site</i>
Impressora	Pórtico	Pórtico	Braço robótico	Braço robótico	Pórtico
Quantidade de MDO	-	-	-	-	-

Fonte: autor/a.

4.COMPARAÇÃO ENTRE CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL E 3DPC

O objetivo deste capítulo é proporcionar uma compreensão mais profunda da dimensão produtiva resultante da utilização da técnica de construção corrente (alvenaria). Neste estudo, realizaremos uma análise comparativa dos custos de mão de obra, materiais de construção e prazo de execução do mesmo projeto. Como tendo como objetivo é apenas a comparação entre a tecnologia corrente e a 3DPC, somente a parte estrutural da residência será considerada.

- Construção Convencional (Alvenaria Estrutural -AE);

Define-se nesta dissertação o termo Construção Corrente como a construção hoje adaptada na generalidade das construções. Por outro lado, a expressão "construção tradicional" pode ser usada para se referir a métodos de construção mais antigos ou tradicionais que podem não ser tão eficientes ou eficazes quanto as técnicas de construção modernas. Além disso, a expressão "construção corrente" também pode ser utilizada para se referir a um processo de construção em andamento atualmente, enquanto "construção tradicional" pode ser mais amplamente associada a técnicas e materiais utilizados no passado [93].



Imagem 67 – Construção convencional [91]

4.1.1 PROJETO DE HABITAÇÃO UNIFAMILIAR (DADOS DE PROJETO)

Nos capítulos anteriores abordou-se acerca de exemplos de construções impressas por construção 3D em diversas regiões do mundo e conclui-se que muitas delas são destinadas à habitação.

Neste caso de estudo foi escolhido um projeto considerada “comum” em Portugal com 2 pavimentos com 200 m² de área útil, ver imagem 68, uma vez que o potencial dessa nova tecnologia se apoia principalmente na possibilidade de criação de casas mais económicas em pouco tempo. O sistema construtivo é composto por blocos de betão para as paredes, laje *em ensoleiramento geral* de 20 cm de espessura para o pavimento térreo, e uma laje de cobertura pré-fabricadas com 25 cm de espessura.

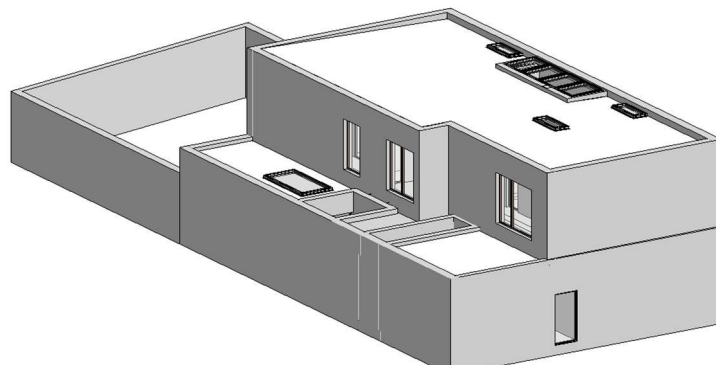


Imagem 68 - Modelo feito a partir do Revit, autoria: Autor/a

4.1.2 TABELA DE QUANTIDADES

Para prosseguir com o cálculo global necessário para a construção da habitação, torna-se imperativo adquirir um conhecimento aprofundado acerca das quantidades dos elementos estruturais. Tendo isso permitirá estimar não apenas os custos dos materiais, mas também os encargos relacionados com a mão de obra. Com essa finalidade em mente, foi elaborada a tabela abaixo, que apresenta de forma pormenorizada os quantitativos dos elementos estruturais.

Quadro 7 - Quantidades referentes aos paramentos a serem construídos.

Artigos	Espessura	Área
Paredes de exteriores	20 cm	209 m ²
Paredes interiores	10 cm	64 m ²
Laje de pavimento	20 cm	225 m ²
Laje de cobertura	30 cm	130 m ²

Fonte: Autor/a

Neste capítulo, serão analisados os rendimentos em tarefas reais e comparados com os valores teóricos das tabelas do LNEC, bem como informações sobre custos e fichas de rendimento de outros autores. As tarefas foram idealizadas considerando condições de trabalho “Boas”, ver imagem 69, sem levar em conta o preço de execução. Vale ressaltar que os rendimentos presentes no livro são escritos em Lisboa, mas os dados foram coletados no Norte, no distrito do Porto, onde os rendimentos de mão de obra são maiores. As condições de obra são descritas para cada trabalho, e a eficiência de trabalho é considerada “Boa”, multiplicando o valor teórico pelo coeficiente correspondente, conforme a tabela de coeficientes.

Condições da obra	Eficiência de trabalho			
	Muito boa	Boa	Média	Má
Boas	1.00	1.11	1.24	1.38
Médias	1.13	1.26	1.40	1.55
Más	1.31	1.45	1.61	1.80

Imagem 69 – Condição de trabalho e condições da obra [91]

4.1.3 CUSTOS E RENDIMENTOS DOS MATERIAIS CASO DE CONSTRUÇÃO CORRENTE (AE)

Neste capítulo tem como objetivo analisar os materiais a serem utilizados na construção de uma habitação com recurso da construção corrente, enfatizando a importância de sua separação de acordo com cada elemento construtivo. Para alcançar esse propósito, foram utilizados dados obtidos a partir das fichas de rendimentos-2020 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Através desses dados, foram calculados os coeficientes de custos e rendimentos para os panos de alvenaria e para fase estrutural, que serviram como base para a elaboração do Quadro 8, apresentando os recursos necessários para o fornecimento de materiais de construção resultando em um custo total estimado de aproximadamente 93.331,00 €.

Quadro 8 - Custo de material para fundações e estrutura;

Art.º	Estruturas e Fundações	Un.	Quant.	Preço Unitário	Total
1	Fornecimento e aplicação de Betão armado com classe de exposição com classe de resistência mínima C30/37 sapatas				16.820,00
	Betão	m3	58,65	147,38	
	Aço	kg	2932	2,08	
	Cofragem	m2	65,78	31,58	

2	Fornecimento e aplicação de Betão armado com classe de exposição com classe de resistência mínima C30/37 lintéis					6.124,00
	Betão	m2	10	147,38	1 473,80	
	Aço	kg	969	2,08	2 015,52	
	Cofragem	m2	83,43	31,58	2 634,72	
3	Fornecimento e aplicação de Betão armado com classe de exposição XC2 (P) com classe de resistência mínima C25/30, aço A500NR (malhasol e reforços de acordo com as especificações do fabricante), em lajes aligeiradas de vigotas pré-esforçadas Piso 1 e cobertura					31.033,00
	Betão	m3	18,17	147,38	2 677,89	
	Lajes pré-fabricadas (aligeiradas)	m2	326	86,98	28 355,48	
4	Fornecimento de montagem de pavimento térreo formado por camada extensa de 20cm espessura, malhasol AQ50 em aço A500 EL					14.437,00
	Betão	m3	18,17	147,38	2 677,89	
	Aço	kg	2 726,00	2,08	5 670,08	
	Cofragem	m2	192,80	31,58	6 088,62	
5	Fornecimento e aplicação de betão armado com classe de exposição XS1 (P) com classe de resistência mínima C30/37, aço A500NR em pilares.					13.942,00
	Betão	m3	14,56	147,38	2677,8946	
	Aço	kg	2725,5	2,08	5 669,04	
	Cofragem	m2	177,17	31,58	5 595,03	
6	Escavação na abertura de fundações em Sapatas e Lintéis, para elementos enterrados.	m3	72,93	35,09	2 559,11	2.559,00
Custo Total (€)					56.027,30	

Fonte: Autor/a

Quadro 9 - Custo de material para execução de alvenarias;

Art.º	Alvenarias	Un.	Quant.	Preço Unitário	Total (€)
1	Execução de Paredes simples interiores em alvenaria de tijolo vazado de 30x20x7 cm	m²	21,24	14,53	308,62
2	Execução de Paredes simples interiores em alvenaria de tijolo vazado de 30x20x9 cm	m²	2,17	15,06	32,68
3	Execução de Paredes simples interiores em alvenaria de tijolo vazado de 30x20x15 cm	m²	209,35	24,04	5.032,77
5	Execução de Paredes simples a formar pano exterior da parede da empena cega de encontro com o vizinho em alvenaria de bloco acústico da ARTEBEL PROETICS BTE20 C400 - A 190 - L200 mm espessura 20 cm,	m²	20,59	38,99	802,80
Custo Total (€)					18.179,56

Fonte: Autor/a.

Quadro 10 - Custo de material para execução de rebocos;

Art.º	Rebocos	Un.	Quant.	Preço Unitário	Total
1	Emboço e reboco com acabamento areado fino, totalmente armado com rede de fibra de vidro antialcalina e reforço em todas as arestas e ligações de diferentes materiais, desgorduramento, perfis ocultos de PVC em todas as arestas, conforme Projeto. Deve ser incluído produto de desgorduramento dos elementos de betão para total aderência das massas.				
	m ²		850	22,5	19.125,00 €

Fonte: Autor/a.

4.1.4 CUSTO E RENDIMENTOS DE MÃO-DE-OBRA E EQUIPAMENTOS (AE)

A fim de conduzir uma análise abrangente, não se limitando apenas à contagem de funcionários e equipamentos, mas também incluindo o desempenho individual de cada membro da equipe e a alocação de trabalhadores e máquinas para tarefas específicas, é necessário criar uma lista completa de todas as tarefas essenciais para concluir a construção da habitação usando métodos convencionais.

As estimativas dos custos de mão de obra e do uso de equipamentos foram baseadas na média de várias empresas de construção civil que oferecem serviços semelhantes ao que está sendo analisado

- 1ª Tarefa: Execução de cofragens para fundação:

Nesta atividade, após cortar e unir os barras de aço, procedeu-se à montagem das bases das estruturas (sapatas) e das vigas de suporte, seguido pelo transporte para o local designado. Um dos trabalhadores realiza o corte da madeira, enquanto o outro coloca os moldes no lugar correto após fazer as medições necessárias. O ajudante é responsável pelo transporte dos moldes, o que nos leva a considerar a eficiência dos trabalhadores principais, uma vez que o progresso do primeiro depende do trabalho dos segundos. Isso é fundamental para completar a tarefa mencionada.

As condições no local de trabalho são consideradas "boas", uma vez que o clima estava ideal e o terreno era adequado para o transporte. A única necessidade é o uso ocasional de escadas para alcançar os pontos desejados.

Nesse processo, é importante separar os moldes usados para as bases das estruturas (sapatas) dos moldes usados para as vigas, já que as taxas de produtividade estabelecidas são diferentes.

Quadro 11 - Custo e rendimento de mão de obra para execução de alvenarias cofragem para fundações;

Para			149 m²		
Tarefa 1					
Cofragem tradicional de solho e sarrafos em fundações (sapatas, vigas e lintéis)					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		<i>h</i>
			Unitários	Totais	Prazo
1,026	<i>h/m²</i>	Carpinteiro de toscos	18,75	1.125,00	50
1,026	<i>h/m²</i>	Carpinteiro de toscos	18,75	1.125,00	
0,44	<i>h/m²</i>	Servente	10,00	600,00	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 2ª Tarefa: Execução de armadura para fundações:

Quadro 12 - Custo e rendimento de mão de obra e equipamentos para execução das armaduras para fundações;

Para			3901 Kg de aço		
Tarefa 2					
Cofragem tradicional de solho e sarrafos, escorados para o terreno em sapatas e vigas					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo (h)
0,03	h/kg	Armador Ferro - Oficial	18,75	135,00	7,22
0,03	h/kg	Armador Ferro - Ajudante	10,00	72,00	
0,03	dia	Máquina cortar e dobrar ferro	11,80	11,80	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 3ª Tarefa: execução de betonagem na fundação (lintéis, vigas e sapatas):

Quadro 13 - Custo e rendimento de mão de obra para betonagem para fundações;

Para			142 m³		
Tarefa 3					
Aplicação de Betão armado com classe de exposição com classe de resistência mínima C30/37 lintéis, Vigas e sapatas					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo (h)
0,63(37min)	h/m^2	Pedreiro - Oficial	15,00	631,00	42 h
0,46	h/m^2	Servente - Ajudante	10,00	420,00	
1.05	m^3	Bombagem betão	12,00	504,00	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 4ª Tarefa: para execução de pilares:

Enquanto os oficiais se asseguram da vibração do elemento a ser betonado os serventes fazem, respetivamente, a mistura de materiais e transporte para os oficiais executarem a tarefa descrita, por isso, apenas, é importante analisar o rendimento dos oficiais.

Na tabela abaixo apresentada, o pedreiro apresenta um rendimento de 0,6 H*h/m² (0,6 x 1,00), perfazendo 16 m³/dia por cada pedreiro.

Quadro 14 - Custo e rendimento de mão de obra para betonagem dos pilares;

Para			18,17 m³		
Tarefa 4					
Aplicação de Betão armado com classe de exposição com classe de resistência mínima C30/37 pilares					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo (h)
0,63(37min)	h/m^2	Pedreiro - Oficial	15,00	631,00	42 h
0,46	h/m^2	Servente - Ajudante	10,00	420,00	
1,05	m^3	Bombagem betão	12,00	504,00	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 5ª Tarefa: Custo e rendimentos de mão-de-obra e para execução da cobertura e piso 1:

A cobertura e o piso 1 serão feitas de laje aligeirada pré-moldadas fora do local de obra como descrito no capítulo 4.2.2, no entanto, só será necessário o posicionamento das lajetas na cobertura e a posterior betonagem de uma camada de 5 cm betão reforçado com malha

eletrosoldada AQ-50, por questões logísticas a lajes pré moldadas convém serem montadas logo a chegada na obra, diminuindo encargos de retrabalho com as cargas de descargas das mesmas.

Enquanto os oficiais se asseguram da vibração do elemento a ser betonado os serventes fazem, respetivamente, a mistura de materiais e transporte para os oficiais executarem a tarefa descrita, por isso, apenas, é importante analisar o rendimento dos oficiais.

Na tabela abaixo apresentada, o pedreiro apresenta um rendimento de 0,6 H*h/m² (0,6 x 1,00), perfazendo 16 m³/dia por cada pedreiro.

Quadro 15 - Rendimento de mão de obra para elaboração de betonagem da cobertura;

Para			36,34 m³		
Tarefa 4					
Aplicação de Betão armado numa camada de 5cm reforçado com malhasol AQ-50					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo (h)
0,6	<i>h/m³</i>	Pedreiro - Oficial	15,00	306	20,4
0,46	<i>h/m³</i>	Servente - Ajudante	10,00	204	
1,05	<i>m³</i>	Bombagem betão	12,00	244,8	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 5ª Tarefa: Execução de alvenarias:

Neste trabalho, estão presentes um pedreiro para assentar as alvenarias e o respetivo servente para a concessão de argamassa de cimento tradicional para o assentamento, bem como o seu transporte. As condições de obra são “Boas”.

Apesar de as tarefas serem diferentes, visto que o servente apenas realiza a mistura de materiais para assentamento de tijolo e o respetivo transporte da mesma.

Foi analisado apenas o valor do oficial, pois, ao fim de uma hora de trabalho, o que fica executado da tarefa em questão depende do oficial, pois o seu tipo de tarefa é o que importa para a análise descrita.

Quadro 16 - Custo e rendimento de mão de obra para elaboração de alvenarias;

Para			253 m²		
Tarefa 5					
Assentamento de alvenarias R/C e piso 1					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo
0,9 (54min)	h/m²	Pedreiro - Oficial	15	6000	142 h
0,56(33 min)	h/m²	Servente - Ajudante	10	4000	
0,055(32min)	h/m²	Betoneira	12	4800	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

- 6ª Tarefa: Custo e rendimentos de mão-de-obra e equipamentos para execução de rebocos:

Reboco em paredes interiores, com 1260 m² para rebocar. Neste caso, os dois serventes fazem, respetivamente, a mistura de materiais e transporte para os oficiais executarem a tarefa descrita, por isso, apenas, é importante analisar o rendimento dos oficiais.

Na tabela abaixo apresentada, o pedreiro apresenta um rendimento de 0,6 H*/h/m² (0,6 x 1,00), perfazendo 16 m²/dia por cada pedreiro, tendo os oficiais da empresa obtido uma melhor *performance* do que os valores teóricos, mas não um valor suficientemente grande, para debater uma discrepância de valores.

Quadro 17 - Custo e rendimento de mão de obra para execução de rebocos;

Para			1260 m²		
Tarefa 6					
Salpico, emboço e reboco com argamassa de cimento e areia ao traço 1:4					
Quantidade	Unidade	Descrição dos recursos	Custos (€)		
			Unitários	Totais	Prazo
0,60 (36 min)	<i>h/m²</i>	Pedreiro - Oficial	15	4725	315 h
0,60 (36 min)	<i>h/m²</i>	Pedreiro - Oficial	15	4725	
0,56 (33 min)	<i>h/m²</i>	Servente - Ajudante	10	3150	
0,055(3min)	<i>h/m²</i>	Betoneira	12	3780	

Nota: Um dia de trabalho é composto por 9 horas e 45 h semanais.

Com a tabela de custos e quantidades em consideração, foi possível concluir o seguinte:

1. O custo total para a construção da parte estrutural da moradia selecionada ascendeu os 128.000,00 €, ver quadro 18.
Esse montante correspondeu a 567,00 € por metro quadrado de área bruta.
2. A criação da parte estrutural se apresentou como o serviço mais dispendioso na composição dos custos da obra, representou um pouco mais de 50% do custo total.
3. Foram necessários 15 trabalhadores para concluir a empreitada valor médio gasto por hora durante o processo de produção da parte estrutural da habitação (incluindo mão de obra e materiais) foi aproximadamente de 1.500,00 €.
4. A estimativa de duração da obra foi de 85 dias, equivalente aproximadamente 3 meses, excluindo dias de descanso semana e feriados desta estimativa. A etapa da empreitada que demandou maior período de execução foi a construção de alvenaria e aplicação de rebocos.

Artigos	Custo (€)
Custo total de material	93.331,00
Custo total de mão-de-obra	34.540,00
Custo total da moradia em construção convencional (€)	128.000,00

Quadro 18 -Custo total da moradia da construção convencional;

4.2. CUSTOS E RENDIMENTOS DOS MATERIAIS CASO 3DPC

4.2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, prossegue-se o processo de comparação, iniciado no capítulo anterior, entre uma habitação concebida com recurso à construção convencional e uma habitação concebida através de tecnologia de impressão 3D com uso de betão. Tal como ocorreu com o método convencional, serão considerados somente os segmentos da residência que englobam os elementos estruturais, a saber: fundações, paredes, pilares e laje de cobertura.

4.2.2 METODOLOGIA

Uma vez que se trata de uma técnica de construção ainda recente, detalhes de custo relacionados com a construção por impressão 3D carecem fortemente de informações detalhadas. No capítulo do estado da arte, foi complexo encontrar a informação relacionada a orçamentos detalhados e à velocidade da impressora no processo de impressão, o que acaba por dificultar a análise de viabilidade deste recurso tecnológico e eventualmente futuras investigações sobre este tema na indústria da construção.

Não foi possível encontrar, na literatura disponível online ou em outros meios, informações sintetizadas com detalhes que mostrassem o custo usual da impressão 3D de uma habitação, incluindo a relação destes custos com a quantidade de material, tempo de equipamentos e mão-de-obra envolvidos na obra. Ou seja, não existem definições detalhadas sobre os gastos em paredes, fundações e laje de cobertura em projetos de impressão 3D que tenham documentação livremente acessível na internet.

Contudo, em alguns casos, como no exemplo da construção do projeto Robust Villa feito pela CyBE Construction no Caribe e a House 1.0 construídos na Dinamarca, são disponibilizados dados sobre o custo de cada elemento estrutural. Embora não tenham sido disponibilizadas informações acerca da área de cada elemento estrutural e as durações mais específicas, este caso revela-se o mais adequado para comparação com o modelo selecionado de construção convencional para o estudo de caso, obtendo o custo da área bruta de cada construção.

4.2.3 ANÁLISE DE CUSTOS

Como é referido no subcapítulo anterior, é utilizado como referência o edifício habitacional feito no Caribe, feita pela Cybe Construction e o caso da House 1.0, os custos diretos para a construção do edifício foram:

- Fundações + Pavimento Térreo – Convencional
- Paredes Impressas (Robust Villa) - \$12.600,00 convertido para 11.317,00 €
- Mão de Obra (Robust Villa) - \$3.200,00 convertido para 2.874,00 €
- Cobertura (House 1.0) - 3.500,00 €

Com os valores totais disponíveis de cada elemento na construção do Robust Villa, procede à divisão de cada um pela área bruta do edifício original. Na tabela abaixo pode ser observado o valor por metro quadrado dos elementos estruturais. É importante salientar que o custo por metro das paredes estruturais de uma habitação depende da sua espessura, contudo desconhece-se a espessura utilizada em nenhuma dessas construções acima citadas.

	Custo (€)	Área bruta da edificação (m ²)	€ por m ²
Fundações	-	-	147,38
Paredes	12600	104	12,00
Cobertura	3500	37	94,95

Quadro 19 - Custo por metro quadrado dos elementos estruturais para habitação da Robust Villa e Casa 1.0

Para prosseguir o processo de pesquisa, que consistiu na determinação dos custos por metro quadrado relativos às fundação, paredes e cobertura da edificação em questão segue-se uma etapa crucial, a conversão do modelo das edificações caribenhas e dinamarquesa para o projeto que se pretende fazer a comparação. Nesta fase, é empregue a metodologia de multiplicação dos valores previamente calculados pela área bruta construída da habitação selecionada para a presente análise. Face à falta de informação esta abordagem foi usada para adequar dos custos estimados às particularidades e exigências construtivas do projeto em questão no contexto português. Ademais, este procedimento visa conferir maior confiabilidade à aplicabilidade no âmbito do cenário nacional.

Artigos	Espessura	Área dos elementos	Custo (€)
Paredes de exteriores	0,20 m	209 m ²	Não aplicável
Paredes interiores	0,10 m	64 m ²	
Laje de pavimento	0,25 m	225 m ²	6.936,60
Laje de cobertura	0,30 m	130 m ²	
Laje de Piso 1	0,30 m	225,5 m ²	
Custo total de mão-de-obra na 3DPC			6.936,00

Quadro 20 - Custos diretos de materiais de construção utilizando os indicadores da Robust Villa;

Artigos	Espessura	Qtd.	Custo (€)
Paredes de exteriores	0,20 m	209 m ²	30.613,00
Paredes interiores	0,10 m	64 m ²	
Laje de pavimento + Fundações	0,25 m	225 m ²	21.586,00
Laje de cobertura	0,30 m	130 m ²	24.688,00
Laje de Piso 1	0,20 m	225,5 m ²	
Custo total da construção da moradia em construção em 3DPC			76.887,00

Quadro 21 - Custo total da moradia em impressão por 3DPC com indicadores da Robust Villa.

Após completar todos os cálculos, obtém-se o valor o valor de custos de materiais €76.887,00 para as modificações estruturais do edifício, de forma a adequar às dimensões especificadas no capítulo 4.

Na sequência, são realizadas análises relativas aos custos diretos referentes à mão-de-obra na construção através do método 3DPC, ver quadro acima.

Uma das principais disparidades em relação à construção convencional reside no facto de não ser necessária a utilização de mão-de-obra para a construção de paredes e pilares, uma vez que as paredes impressas possuem carácter estrutural.

Contudo, permanece a exigência de empregar mão-de-obra convencional para construção de fundações, bem como para a execução do piso e cobertura, desta forma tem se estimativa de custo de mão de obra de 6.936,60 €.

Após todas as análises e cálculos realizados, obteve-se o montante definitivo de € 83.823,00 € para execução da parte estrutural do edifício, adaptada para atender às dimensões da habitação mencionada no capítulo 4.

Em seguida, são conduzidas minuciosamente análises comparativas abrangendo diversos fatores entre os dois exemplos estudados, com ponderações relevantes sobre investigações similares, que visavam enfatizar as disparidades entre uma construção 3D e outra desenvolvidas por métodos convencionais.

Artigos	Custo (€)
Custo total de material	76.887,00
Custo total de mão-de-obra	6.936,00
Custo total da moradia em impressão 3D (€)	83.823,60

Quadro 22 – Custo total da Construção por 3DPC

4.2.4 ANÁLISE DA DURAÇÃO DA CONSTRUÇÃO POR 3DP

Para obter uma análise em relação à duração da empreitada foi escolhida a impressora *CyBe Crawler*, a mesma usada na Robust Villa em Curaçao com dimensões de (2.5 x 3.0 x 4.0 m) pode atingir velocidade de 55 mm/s (0.055 metros por segundo), ver especificações na imagem 70 [81].

PERFORMANCE:

Position repeatability	0.15 mm	0.15 mm	0.15 mm	0.15 mm	0.15 mm
Path repeatability:	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
Print material ⁽³⁾	CyBe MORTAR	CyBe MORTAR	CyBe MORTAR	CyBe MORTAR	CyBe MORTAR
Layer resolution ⁽⁴⁾	10 - 50 mm	10 - 50 mm	10 - 50 mm	10 - 50 mm	10 - 50 mm
Print speed ⁽⁵⁾	50 - 500 mm/s	50 - 500 mm/s	50 - 500 mm/s	50 - 250 mm/s	50 - 500 mm/s
Driving speed		3 km/h			
Print precision	1 / 1 / 1 mm	1 / 1 / 1 mm	1 / 1 / 1 mm	1 / 1 / 1 mm	1 / 1 / 1 mm
Nozzle Diameter ⁽⁴⁾ - standard ⚙	1"	1"	1"	1"	1"

Imagem 70 – Condição de trabalho e condições da obra [81]

A metodologia usada para obter a duração da impressão do projeto em análise será:

Para imprimir 1 metro quadrado (1 m²) a uma velocidade de 0.055 metros por segundo, podemos usar a mesma fórmula:

- Tempo = Largura / Velocidade;
- Para 1 m², a largura seria de 1 metro (pois a altura também seria de 1 metro);
- Tempo = 1 metro / 0.055 metros por segundo;
- Tempo ≈ 18.18 segundos;

Portanto, levaria aproximadamente 18.18 segundos para a impressora 3D imprimir 1 metro de uma camada de 50 mm de argamassa numa velocidade de 0.055 metros.

Tendo as quantidades teóricas do projeto em análise:

▪ Tarefa 1

Impressão de 225,5 m ³ numa velocidade de 55 mm/s			
Quantidade	Espessura	Descrição dos recursos	Tempo (h)
225,5 m ³	0,2 m	CyBe Crawler	4.5

▪ Tarefa 2

Impressão de 273 m ² numa velocidade de 55 mm/s			
Quantidade	Espessura	Descrição dos recursos	Tempo (h)
273 m ²	0,2 m	CyBe Crawler	5.5

▪ Tarefa 3

Impressão de 18.17 m ³ numa velocidade de 55 mm/s			
Quantidade	Espessura	Descrição dos recursos	Tempo (h)
130 m ²	0,3 m	CyBe Crawler	4

Feitos os cálculos de tempo, chega-se a um total de 14 horas de impressão, considerando-se 9 horas como a duração de um dia de trabalho laboral. A impressão deste projeto será concluída em dois dias laborais.

5

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO

Com base nos indicadores determinados nos dois capítulos anteriores, são em seguida analisados alguns pontos que evenciam benefícios de uma das técnicas perante a outra, de forma a proporcionar uma justa comparação entre as duas soluções estruturais.

Com base na análise efetuada no subcapítulo anterior, devido à falta de informações detalhadas relativas a habitações construídas através da tecnologia de 3DPC, relevou-se inviável obter com precisão os custos individuais associados a cada elemento estrutural, em relação às suas dimensões. Foram evidenciados no quadro 21 do capítulo 5, obteve-se o valor global das fundações, paredes e laje de cobertura, considerando aspetos de mão de obra e custo de matérias, no contexto do modelo de construção 3DPC e foram tiradas ilações acerca do custo e do prazo da construção tradicional.

5.2 COMPARAÇÃO NO PONTO DE VISTA DE MÃO DE OBRA CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL E 3DPC

Ao analisar os dados apresentados nos quadros 21 e 18, é possível perceber que a utilização da técnica de impressão 3D resultou em uma redução de custos em relação à técnica tradicional. Contudo, é importante notar que essa redução é de apenas 35% no valor total dos trabalhos de estrutura.

Com o intuito de destacar de maneira mais clara as disparidades, serão apresentadas a seguir as diferenças específicas para cada um dos três elementos estruturais considerados:

5.2.1) Fundações: Ao optar pela técnica de construção 3DPC, foi notado que as fundações de diversas residências analisadas no capítulo 4 ainda seguem o método tradicional de construção. Esse método envolve etapas como a colocação de armaduras de ferro, a montagem de cofragens, a aplicação de concreto por meio de betonagem e, por fim, a realização da impermeabilização. Tanto para o ensoleiramento geral quanto para as fundações isoladas, ainda é necessário empregar uma quantidade significativa de mão de obra.

No entanto, ao comparar esses dois métodos no estudo de caso, a abordagem de construção em 3DPC não demonstrou reduções significativas nos custos nem na quantidade de mão de obra

requerida. A utilização dessa técnica também demandou a presença de profissionais especializados em várias etapas do processo. Por exemplo, foram necessários dois trabalhadores para montar as cofragens, mais dois para a instalação das armaduras de ferro e outros dois para a aplicação das cofragens.

5.2.2) Paredes: No estudo de caso, percebemos que escolher a impressão 3D resulta em custos mais baixos em comparação com os gastos associados à construção tradicional com tijolos e reboco. Vale destacar que um dos maiores gastos na construção convencional é a aquisição de materiais e a contratação de mão de obra para construir com tijolos. Além disso, é importante mencionar que a aplicação de reboco e pintura nas paredes não é obrigatória na construção por impressão 3D. Portanto, essas etapas não foram incluídas no estudo de caso.

5.2.3) Laje de cobertura: Ao escolher a impressão 3D como técnica construtiva pode reduzir os custos, se optar pelas “pré-lajes”, utilizada no exemplo da casa 1.0 na Dinamarca, ver imagem 71, que é uma técnica de construção parecida com a montagem de lajes aligeiradas pré-fabricadas na construção convencional, mantendo-se encargos de necessidade de uma grua e mão de obra especializada para auxiliar na montagem das lajes. Dessa forma, conclui-se que embora a impressão 3D tenha demonstrado benefícios econômicos em certos elementos estruturais, é necessário ponderar cuidadosamente os custos adicionais em outros componentes para uma avaliação mais abrangente do método construtivo, para melhor compressão da estimativa de mão de obra para as duas tecnologias para o estudo de caso ver gráfico 1.

No cenário da construção convencional (CC), uma equipe de 15 trabalhadores foi requerida, enquanto na construção utilizando 3DPC, apenas 8 pessoas foram necessárias para o processo, ver gráfico 1.

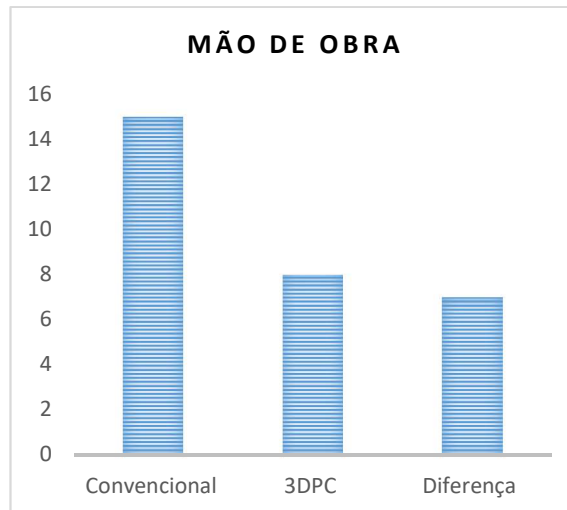


Gráfico 1 - Representativo de quantidade de mão de obra nas entre as 2 tecnologias de construção.

5.3 COMPARAÇÃO NO PONTO DE VISTA DA DURAÇÃO DAS TECNOLOGIAS AE E 3DPC

A análise comparativa entre os dois métodos construtivos revelou que a abordagem de impressão 3D para construção apresenta notáveis vantagens em diversos aspectos, tais como redução na necessidade de mão de obra, aceleração do tempo de edificação, diminuição nos gastos com transporte e custo global do empreendimento.

A estimativa inicial para a conclusão da obra era de 89 dias em construção convencional (aproximadamente 3 meses) enquanto a 3DPC duraria apenas 2 dias.

Contudo, ao adotar a tecnologia de impressão 3D, o tempo de execução foi reduzido de forma notável, diminuindo em cerca de 97,7%.

Esses resultados enfatizam a eficácia e a viabilidade da construção através da impressão 3D. No entanto, é vital ressaltar que essas conclusões são específicas para o caso em estudo e podem variar em contextos distintos. Não obstante, essas descobertas conferem informações valiosas aos profissionais da indústria da construção, auxiliando-os na tomada de decisões embasadas e na busca por aprimoramentos na eficiência, qualidade e sustentabilidade na construção de ambientes sanitários.

Quadro 23 – Comparação do ponto de vista de duração da construção entre as duas tecnologias.

	Tempo	m/h
Alvenaria	89 dias	Variável
3DP	2 dias	0.055

Fonte: Autor/a

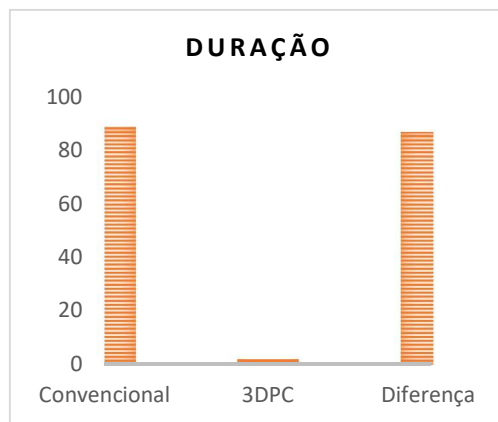


Gráfico 2 - Representativo do total de dias de construção para as 2 tecnologias de construção.

5.4 COMPARAÇÃO NO PONTO DE CUSTOS

Conforme ilustrado na seção anterior, devido à falta de informações detalhadas disponíveis sobre residências produzidas por meio da impressão 3D, não foi possível obter um cálculo preciso dos custos de cada elemento estrutural com relação às suas dimensões correspondentes (expressas em metros quadrados ou metros cúbicos). Como resultado, foi necessário adotar uma abordagem simplificada, baseada exclusivamente em indicadores relacionados à área total bruta. Por fim, ao analisar o custo total da construção, conforme apresentado nos quadros 18 e 22, observou-se uma diferença de custos de aproximadamente 44.777,00 €. Isso é evidenciado no gráfico 3, onde a tecnologia de construção 3DPC demonstrou ser menos dispendiosa.

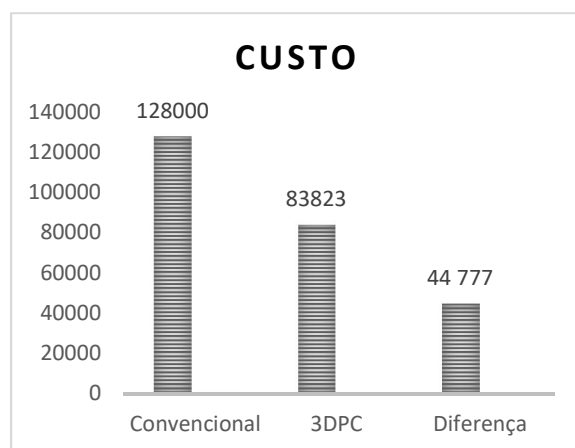


Gráfico 3 - Representativo do custo da construção para as 2 tecnologias.

6

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Através do estudo realizado para esta dissertação, foram compreendidas várias temáticas relacionadas com a Impressão 3D. Nesse contexto, procurou-se responder aos objetivos gerais, que visam analisar as tendências mundiais da utilização desta tecnologia na indústria da construção, levando à conclusão de que:

- Comprovou-se também que na área da Construção, têm surgido nos últimos anos, novas abordagens e inovações relacionadas com a Impressão 3D (3DP), abrindo assim um novo mundo de oportunidades a este setor, sobretudo com uma maior hipótese de personalização dos seus produtos (desde pequenos elementos construtivos até edifícios completos) e respetiva otimização de forma a reduzir tempo despendido para a produção dos mesmos. Neste contexto, também se evidenciou a importância da sustentabilidade ambiental com a utilização de técnicas inovadoras, como a construção de corais artificiais através da Impressão 3D.
- No capítulo 3.2, aborda-se a construção de corais artificiais como uma solução promissora para a preservação dos ecossistemas marinhos, que sofrem com a degradação causada por diversas atividades humanas. Através da tecnologia de Impressão 3D, é possível reproduzir estruturas complexas semelhantes aos corais naturais e implantá-las em áreas de recifes danificadas ou degradadas. Esses corais artificiais criam um ambiente propício para o crescimento de organismos marinhos, facilitando assim a restauração dos ecossistemas e contribuindo para a diversidade biológica dos oceanos.
- A evolução da construção em 3D, impulsionada por avanços na robótica, tem sido promissora. A criação de impressoras de grande formato, abordada no capítulo 3.3, desempenha um papel central nesse progresso. Três categorias principais de impressoras de grande formato são destacadas: as com braço robótico, sistemas de pórtico (*gantry*) e grupos de robôs móveis (*Mini-Builders*). Cada uma delas oferece vantagens distintas para diferentes aplicações e tem sido fundamental para a expansão da 3DPC.
- Foi demonstrado que o método de Extrusão de Material é o mais frequentemente utilizado no desenvolvimento de sistemas de 3DP para a construção, o que possibilita a impressão de edifícios grandes e estruturas complexas com alta eficiência. Países como Estados Unidos, Holanda e China dominam a fabricação de impressoras e o fornecimento de serviços de impressão. No entanto, as argamassas imprimíveis mais produtivas não seguem completamente a eficiência ambiental que a 3DP pode oferecer, especialmente em sua dependência do PC (cimento Portland). Agora que a tecnologia está amadurecendo e os aspetos estruturais tecnológicos estão se estabilizando, mais pode ser feito em relação à sustentabilidade dos sistemas e sua caracterização estética.

- Os materiais utilizados incluem argamassas à base de cimento, geopolímeros e impressão 3D com metais. Os geopolímeros surgem como uma alternativa sustentável ao PC (cimento Portland), devido à menor emissão de CO₂ a tecnologia de impressão 3D com metais também avançou consideravelmente.
- A 3DPC oferece oportunidades para redução do impacto ambiental, otimização de estruturas e designs inovadores na construção. A pesquisa contínua e investimentos nesse campo são fundamentais para a evolução da tecnologia e seus benefícios para uma construção mais sustentável.

6.1.1 COMPARATIVO ENTRE A TECNOLOGIA DE 3DPC E A CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL

Tendo como segundo e terceiro objetivos o desenvolvimento de um protótipo de uma habitação unifamiliar em alvenaria estrutural, seguido de uma análise fundamentada nas questões econômicas e de prazo, chegou-se às seguintes conclusões:

- No que diz respeito aos custos, no capítulo 5.1 destacou-se que a impressão 3D resultou em uma redução total de cerca de 35% em relação à técnica de construção convencional. Essa redução de custos foi especialmente notável nas paredes estruturais, onde o uso da impressão 3D dispensou a necessidade de construção de panos de alvenaria com uso de tijolos e a posterior colocação de reboco.
- Os dados dos quadros 21 e 18 revelam que a técnica 3DPC reduziu os custos em mão de obra em comparação com a técnica convencional. Nas fundações, a abordagem 3DPC não mostrou redução significativa de custos nem de mão de obra, exigindo profissionais especializados. No entanto, nas paredes, a 3DPC resultou em economia de custos em comparação com a construção convencional com a execução de tijolos e reboco. Quanto à laje de cobertura, optar pela 3DPC pode reduzir custos, especialmente com a técnica de "pré-lajes". Na construção convencional, foram necessários 15 trabalhadores, enquanto na 3DPC, apenas 8 foram requeridos.
- Em relação à duração da construção, a utilização da 3DPC trouxe uma redução impressionante de 97,7% no tempo necessário para concluir a obra. Enquanto a construção tradicional demandaria aproximadamente 85 dias, a 3DPC permitiu que o projeto fosse finalizado em apenas 2 dias. Isso demonstrou claramente a eficiência da técnica de 3DPC na redução do tempo de construção.
- Apesar das vantagens econômicas e de tempo proporcionadas pela impressão 3D, a análise pondera que é importante considerar cuidadosamente os custos adicionais em outros componentes do projeto. Por exemplo, embora a impressão 3D tenha sido vantajosa para as paredes e laje de cobertura, ainda foram necessárias fundações construídas de forma convencional.
- Portanto, a decisão de escolher a tecnologia de impressão 3D para a construção deve ser avaliada considerando diversos fatores, incluindo as características específicas do projeto, os custos envolvidos em cada componente e os benefícios em termos de rapidez e eficiência que a impressão 3D pode proporcionar.
-

6.1.2 DESENVOLVIMENTO FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

Ainda é crucial continuar realizando pesquisas para aproveitar as vantagens oferecidas pela tecnologia, especialmente aquelas relacionadas a:

- **Legislação e regras de boa execução:** Não existem regras claras para o uso da impressão 3D na construção civil, tornando difícil usá-la de maneira que cumpra todas as leis e regulamentos existentes.
- **Novos materiais imprimíveis:** Desenvolvimento de uma mistura de concreto imprimível que utiliza materiais reciclados também reduzirá o custo e melhorará significativamente o índice de sustentabilidade da técnica de construção [94].

- **Industrialização na execução das infraestruturas entre várias especialidades:** Nos exemplos de projetos já realizados, podemos observar que não há uma padronização na utilização de métodos industrializados na construção de infraestruturas. Em muitos casos, ainda é necessário recorrer aos métodos tradicionais de construção para execução de tubagens.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Foy e F. Shahbodaghlu, «3D Printing For General Contractors: An Analysis of Potential Benefits», 2015.
- [2] «3D PRINTING-A REVOLUTION IN THE MAKING».
- [3] Silva Ana Carla Pires, «Exemplos de Aplicação de Impressão 3D na Construção», Porto, Portugal, 2020. [Em linha]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [4] Felipe Ruiz, «Estudo de Viabilidade da Aplicação de Impressão 3D em Empreendimentos na Construção Civil», Universidade Estadual Paulista - Júlio De Mesquita Filho , Sorocaba , 2022. Acedido: 12 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/237998/ruiz_fp_tcc_soro.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [5] I. Gibson, D. Rosen, e B. Stucker, «Development of Additive Manufacturing Technology», em *Additive Manufacturing Technologies*, Springer New York, 2015, pp. 19–42. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_2.
- [6] F. De e C. Administrativas, «UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL». [Em linha]. Disponível em: <https://secure.urkund.com/view/47020133-617134->
- [7] «ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing», ISO/ASTM 52900. Acedido: 18 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- [8] S. Vyavahare, S. Teraiya, D. Panghal, e S. Kumar, «Fused deposition modelling: a review», *Rapid Prototyping Journal*, vol. 26, n. 1. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 176–201, 8 de Janeiro de 2020. doi: 10.1108/RPJ-04-2019-0106.
- [9] S. Pessoa, A. S. Guimarães, S. S. Lucas, e N. Simões, «3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, Mai. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110794.
- [10] F. Craveiro, J. P. Duarte, H. Bartolo, e P. J. Bartolo, «Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0», *Automation in Construction*, vol. 103. Elsevier B.V., pp. 251–267, 1 de Julho de 2019. doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.011.
- [11] «Binder Jetting ». Acedido: 5 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/inkjet-printing.png>
- [12] «DED». Acedido: 24 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.3ds.com/make/guide/process/directed-energy->

deposition?utm_campaign=202305_glo_cnbco_3dexperienceDraftsight_en_CMP1409_I
abl&utm_medium=paidsocial&utm_source=pmax&utm_content=sc&gclid=Cj0KCQjwwv
ilBhCFARIsADvYi7LMKJrk6Rf7BnjBfXD77saovvpYfeZsJBU3OPeU1adAQi5HQLqpqh8aApD
MEALw_wcB

- [13] Mateus Malagón Paredes Costa, «Análise de tempo e Custo da Implementação de uma Impressora 3D na setor da construção.», Universidade Católica de Colombia , Bogotá , 2020.
- [14] Dassault Systemes, «Sheet Lamination ».
- [15] F. De e C. Administrativas, «UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL». [Em linha]. Disponível em: <https://secure.arkund.com/view/47020133-617134->
- [16] M. S. Fragoso, «DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL ADOÇÃO DE FABRICO ADITIVO NA GESTÃO DA CADEIA DE ABASTECIMENTO: O CASO DAS PEÇAS DE SUBSTITUIÇÃO».
- [17] S. Mellor, L. Hao, e D. Zhang, «Additive manufacturing: A framework for implementation», em *International Journal of Production Economics*, Mar. 2014, pp. 194–201. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.07.008.
- [18] «3D Printing Market». Acedido: 27 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Thanks/subscribepurchaseNew.asp?id=1276>
- [19] «Revolução da tecnologia 3D na indústria automotiva». Acedido: 29 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/pt-br/tecnologia-3d-no-setor-automotivo/>
- [20] «Aerospace Achieving new heights with 3D printing». Acedido: 29 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://www.materialise.com/en/industries/aerospace?gclid=CjwKCAjw8ZKmBhArEiwA spcJ7qPVLE09wM2q6vYZff2qewZxsrxn5MqyPC_DzjRZZtNgG0rw6gTbkhoCzCgQAvD_BwE
- [21] «3DP na medicina ». Acedido: 29 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://codi.pt/3dfactorystore/medicina/?gclid=CjwKCAjw8ZKmBhArEiwAspcJ7vALNUs DYnxx3f0drsY7PrR9n_WtITAcBHUmSlzYvPHKKPDvvKKJjxoCLaQQAvD_BwE
- [22] «Como-a-impressao-3d-esta-revolucionando-a-industria-de-joias/». Acedido: 29 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: 3dapplications.com.br/2020/08/14/como-a-impressao-3d-esta-revolucionando-a-industria-de-joias/
- [23] I. N. Rodrigues, «IMPRESSÃO 3D E SUA APLICAÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL», Coimbra , 2021.
- [24] C. Holt, L. Edwards, L. Keyte, F. Moghaddam, e B. Townsend, «Construction 3D Printing», em *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier, 2019, pp. 349–370. doi: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00017-8.
- [25] «3DP para bens de consumo ». Acedido: 29 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://ts2.space/pt/os-beneficios-da-impressao-3d-para-bens-de-consumo/>
- [26] «<https://www.defesanet.com.br/defesa/noticia/40355/prospeccao-tecnologica-em-impressao-3d-nas-forcas-armadas-da-holanda-nos-teatros-de-operacoes-militares/>».

- [27] «<https://profissaobiotec.com.br/producao-de-alimentos-por-impressao-3d/>».
- [28] «<https://www.rapiddirect.com/pt/blog/3d-printing-in-the-energy-sector>».
- [29] T. Wangler *et al.*, «Digital concrete: Opportunities and challenges», *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 67–75, 2016, doi: 10.21809/rilemtechlett.2016.16.
- [30] J. Teixeira, C. O. Schaefer, B. Rangel, L. Maia, e J. L. Alves, «A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art», *Frontiers of Architectural Research*, vol. 12, n. 2. KeAi Communications Co., pp. 337–360, 1 de Abril de 2023. doi: 10.1016/j.foar.2022.10.001.
- [31] D. M. Kim, «Contour Crafting: A Future Method of Building».
- [32] L. Santos, D. A. Silva, J. Manuel, M. Amorim, e A. Faria, «USO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS MORADIAS NO BRASIL Uma oportunidade ou uma utopia? Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES». [Em linha]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [33] C. Rouhana, M. Aoun, F. Faek, e M. El Jazzer, «The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing) Optimization of Crane Operations View project», 2014, doi: 10.13140/RG.2.1.1718.4646/1.
- [34] «<https://d-shape.com/Prodotti/unacasatuttadiunpezzo/>».
- [35] «UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE CENTRO DE TECNOLOGIA CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL MARCELLA DE SENA BARBOSA DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS PARA IMPRESSÃO 3D COM CONSUMO DE CIMENTO REDUZIDO POR MEIO DE ADIÇÕES MINERAIS NATAL/RN 2022».
- [36] D. De, M. Apresentada, e F. De, «EXPLORAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO GONÇALO TEIXEIRA FERREIRA LOPES M 2016». [Em linha]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [37] Archidaily, «Impressão 3D em design de interiores », 2022.
- [38] C. Buchanan e L. Gardner, «Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges», *Engineering Structures*, vol. 180. Elsevier Ltd, pp. 332–348, 1 de Fevereiro de 2019. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
- [39] J. Xu, Ding, e Lieyun;, «Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing.».
- [40] «Home Design Ideas For Modern Living». Acedido: 18 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.homedit.com/the-ultimate-off-the-grid-home/>
- [41] «WASP». Acedido: 16 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>
- [42] ArchiDaily, «Impressão 3D com baixo teor de carbono: reduzindo as emissões de CO2 e o desperdício de materiais».
- [43] «Fundações Off - site ». Acedido: 7 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.hyperionrobotics.com/projects/pad-foundation>

- [44] «Como as impressoras 3d ajudam os corais de recife », pp. 1–1, Jul. 2023, Acedido: 7 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.impresoras3d.com/pt/como-a-impress%C3%A3o-3D-ajuda-na-manuten%C3%A7%C3%A3o-dos-recifes-de-coral/>
- [45] CyBE Construction, «Artificial Reef ». Acedido: 7 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cybe.eu/solutions/artificial-reef/>
- [46] J. Xiao *et al.*, «Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities», *Cement and Concrete Composites*, vol. 122. Elsevier Ltd, 1 de Setembro de 2021. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115.
- [47] Y. W. D. Tay, B. Panda, S. C. Paul, N. A. Noor Mohamed, M. J. Tan, e K. F. Leong, «3D printing trends in building and construction industry: a review», *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, n. 3. Taylor and Francis Ltd., pp. 261–276, 3 de Julho de 2017. doi: 10.1080/17452759.2017.1326724.
- [48] «BOD2-Specifications-1».
- [49] «Mini builders ». Acedido: 9 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://iaac.net/wp-content/uploads/2018/05/iaac-minibuilders-1024x683.jpg>
- [50] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, e T. Salet, «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing», *Virtual Phys Prototyp*, vol. 11, n. 3, pp. 209–225, Jul. 2016, doi: 10.1080/17452759.2016.1209867.
- [51] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, e R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers», *Additive Manufacturing*, vol. 20. Elsevier B.V., pp. 44–67, 1 de Março de 2018. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- [52] Z. Malaeb e F. Hamzeh, «Design Management View project Organizational Issues and behavior View project», 2015. [Em linha]. Disponível em: www.jifactor.com
- [53] V. N. Nerella, M. Krause, e V. Mechtcherine, «Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability», *Autom Constr*, vol. 109, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102986.
- [54] J. H. S. T. Teixeira, «Impressão 3D com Extrusão de Materiais Cimentício», 2018.
- [55] «CyBe Mortar ». Acedido: 1 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/mortar/>
- [56] «D FAB».
- [57] G. L. F. Benachio, M. do C. D. Freitas, e S. F. Tavares, «Circular economy in the construction industry: A systematic literature review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 260. Elsevier Ltd, 1 de Julho de 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121046.
- [58] «MX3D». Acedido: 16 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://mx3d.com/services/print-on-demand/>
- [59] T. Antunes, «Agentes compatibilizantes em formulações de Biopolímeros com cortiça para impressão 3D», Universidade de Aveiro, Aveiro, 2018.
- [60] ArchiDaily, «Cabana Urbana / DUS Architects». Acedido: 9 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/796836/cabana-urbana-dus-architects>

- [61] B. Panda, J. H. Lim, e M. J. Tan, «Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction», *Compos B Eng*, vol. 165, pp. 563–571, Mai. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.02.040.
- [62] M. S. , S. A. , A. P. & G. A. M. Dedenis, «Efeito de metacaulim, cinzas volantes e fibras de polipropileno nas propriedades frescas e reológicas de materiais cimentícios à base de impressão 3D», *Fabricação Digital* , vol. 28, n. 2020, Jul. 2020.
- [63] H. Alhumayani, M. Gomaa, V. Soebarto, e W. Jabi, «Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete», *J Clean Prod*, vol. 270, Out. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122463.
- [64] X. W. , Zhenxing Li, «Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with basalt, glass, and PVA fibers», *Building Engeneering* , pp. 1–1, Jul. 2020.
- [65] «The Bod (Exterior)». Acedido: 27 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.treehugger.com/nobody-has-d-printed-house-hours-4857122>
- [66] «Reinforcement The Bod». Acedido: 29 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.peri-usa.com/3d-constructionprinting/the-bod-building.html>
- [67] COBOD, «COBOD ». Acedido: 12 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cobod.com/solution/bod2/>
- [68] «sistema de pórtico COBOD ». Acedido: 18 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/cobod-3d-printer-ordered-for-construction-in-saudi-arabia-151309/>
- [69] <https://www.youtube.com/watch?v=6IKjkkqDxLc&t=844s>.
- [70] «Cobod BOD 2.5 3D Construction Printer Operation & Safety 101». Acedido: 26 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6IKjkkqDxLc>
- [71] «wasp GAIA». Acedido: 17 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://casa.abril.com.br/sustentabilidade/casa-e-construida-em-10-dias-com-materiais-biodegradaveis-e-impressa-em-3d>
- [72] <https://www.youtube.com/watch?v=KPaOCWrZl94>.
- [73] «The Gaia House is a 3D-printed prototype made of biodegradable materials». Acedido: 9 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://facadesplus.com/the-gaia-house-is-a-3d-printed-prototype-made-of-biodegradable-materials/>
- [74] «<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>».
- [75] «Cybe Robust Villa». Acedido: 6 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cybe.eu/cases/robust-villa/>
- [76] 3D Concrete, «Robust Villa - 3D Concrete ». Acedido: 16 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://3dconcretocaribbean.com/robust-villa/>
- [77] «cyBe ».
- [78] «CyBe Construction ». Acedido: 27 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cybe.eu/affordable-housing/general-contracting/>

- [79] CYBE, «CYBE ». Acedido: 12 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cybe.eu/>
- [80] «Cost-Indication-Robust-Villa», *CyBe construction* . pp. 1–1, 2021.
- [81] C. Construction e B. V Wethouder Van Eschstraat, «CyBe 3Dcp SPECIFICATIONS», 2022. [Em linha]. Disponível em: www.CyBe.eu
- [82] Apis Cor, «A San Francisco startup 3D printed a whole house in 24 hours», A San Francisco startup 3D printed a whole house in 24 hours. Acedido: 23 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://www.engadget.com/2017-03-07-apis-cor-3d-printed-house.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlMmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAlbQyYr7lvbwMrEvExOMd9TEj8v10q-Y87Tx6FaHWJnr87mW-Lmg1QhPEZH87WzRAVhsuWjc5pmFZ3szCbo9DC8bUGGZdTgqZybT_86u8NXRHERVJNoxZzy9TTq4Jpjb7x-BA6jrx5GpW5iozheFJhsAgIZ8Wv1uWBnGcZc7-mcd
- [83] Apis Cor, «3D Printed Structures As Comparable to Masonry Construction», vol. 1, 2019.
- [84] Apis Cor, «Apis Cor: first residential house has been printed!», 2017. Acedido: 23 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xktwDfasPGQ>
- [85] «PROCESSO DE IMPRESSÃO RÚSSIA», pp. 1–1, Jun. 2023, Acedido: 18 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: [HTTPS://WWW.CIVIL.COLUMBIA.EDU/CONTENT/ADVANCED-MATERIALS-0](https://WWW.CIVIL.COLUMBIA.EDU/CONTENT/ADVANCED-MATERIALS-0)
- [86] Muito Geek, «Apis Cor ». Acedido: 6 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://muitogeek.com/2018/07/03/apis-cor-3d-conheca-a-impressora-que-constroi-casas/>
- [87] «Esta casa foi impressa em 3D em apenas 24 horas e por apenas US \$ 10.000». Acedido: 18 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://futurism.com/this-home-was-3d-printed-in-only-24-hours-and-for-just-10000>
- [88] «<https://cobod.com/projects-partners/3dcp-group/>».
- [89] «danish startup builds first 3D printed concrete tiny house in europe». Acedido: 1 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.designboom.com/architecture/first-3d-printed-tiny-house-europe-3dcp-05-30-2022/>
- [90] «DESIGN BOOM». Acedido: 16 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.designboom.com/technology/wasp-project-big-delta-large-scale-3d-printer-09-18-2015/>
- [91] «Imagem de Construção Convencional ». Acedido: 22 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://nia.gov.kn/nevis-deputy-premier-pleased-with-progress-of-newcastle-police-station-construction/>
- [92] *Placing of pre 3D Slabs*, (2022).
- [93] R. B. Kato, «COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA CONSTRUTIVO CONVENCIONAL E O SISTEMA CONSTRUTIVO EM ALVENARIA ESTRUTURAL SEGUNDO A TEORIA DA CONSTRUÇÃO ENXUTA».

- [94] C. Vinicius, E. Formiga, e M. L. Carneiro, «IMPRESSÃO 3D PARA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO DA LITERATURA E DESAFIOS 3D PRINTING FOR CIVIL CONSTRUCTION: LITERATURE REVIEW AND CHALLENGES».
- [95] «COBOD PRINTING». Acedido: 15 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/970937/can-3d-printing-reshape-residential-architecture-as-we-know-it/6179891ff91c81174000005a-can-3d-printing-reshape-residential-architecture-as-we-know-it-image>
- [96] «<https://3dconcretocaribbean.com/robust-villa/>».

ANEXO 1

PLANTA DA CASA EM ALVENARIA ESTRUTURAL

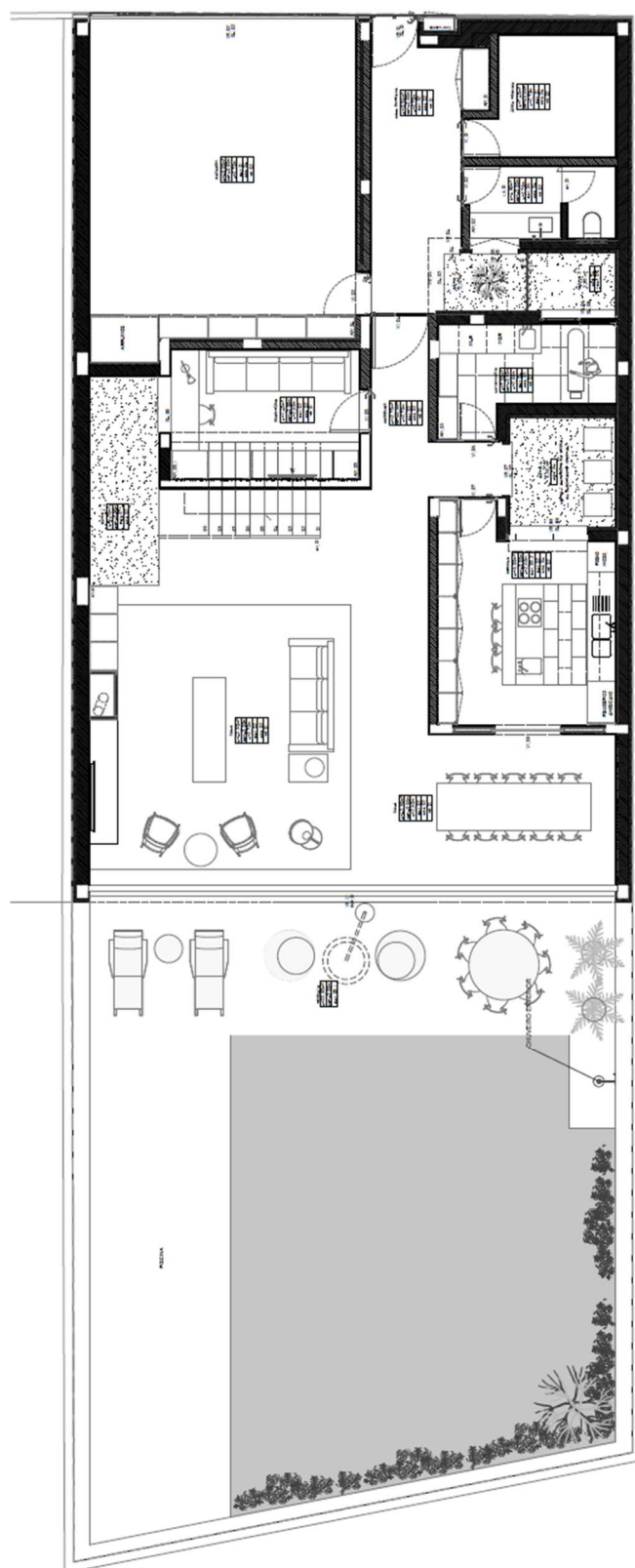


Imagem 44 - Planta R/C



Imagem 45 - Planta Piso 1

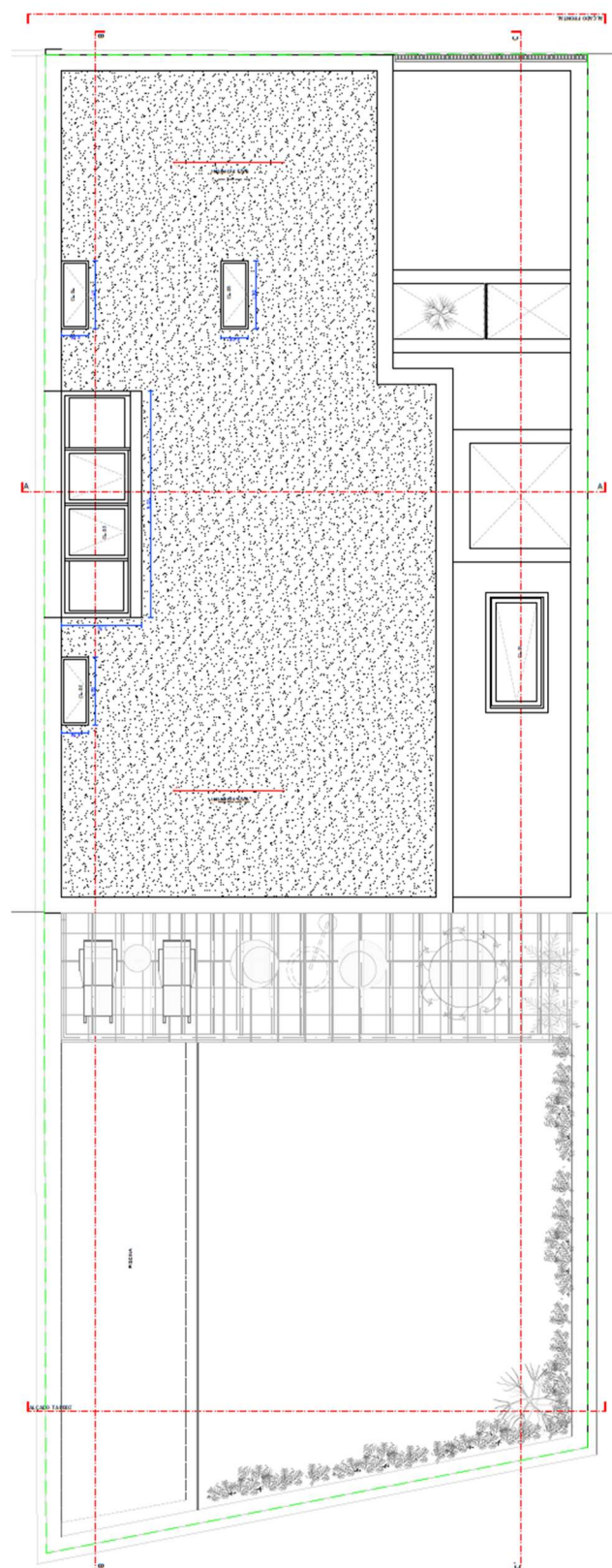
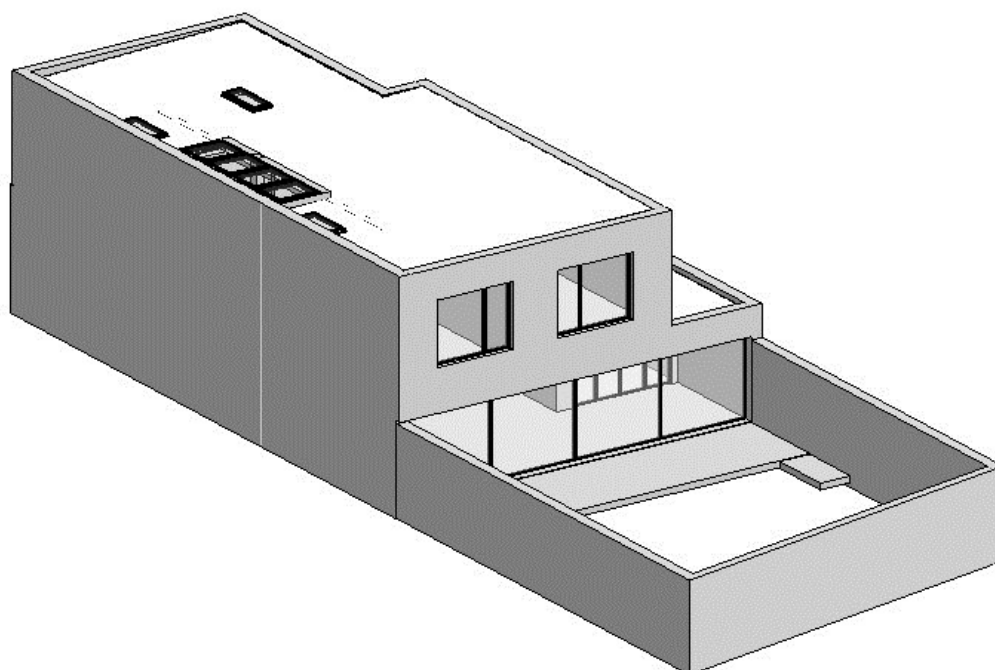
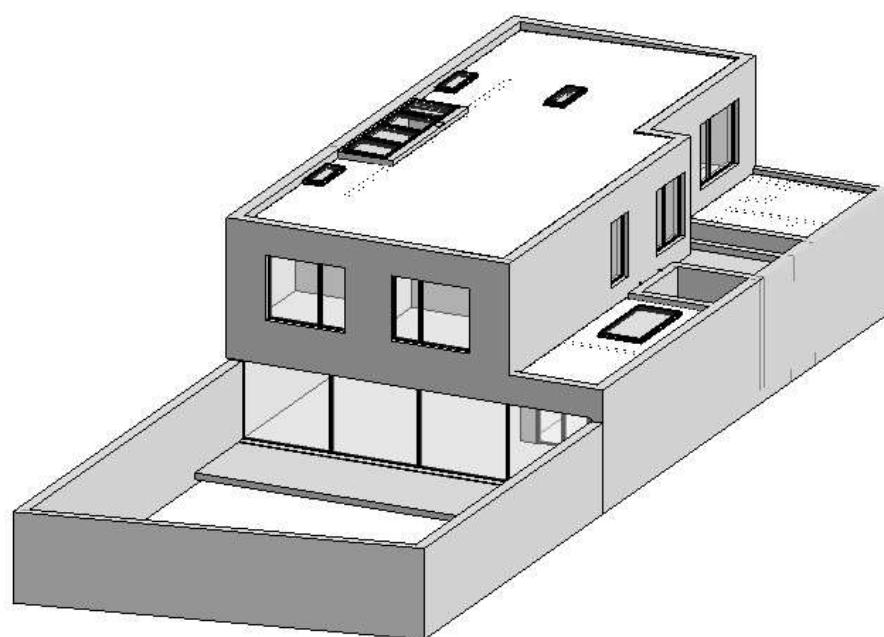


Imagem 46 - Planta da cobertura

ANEXO 2

VISTAS EM 3D CASA DO EM ALVENARIA ESTRUTURAL



ANEXO 3

CORTES

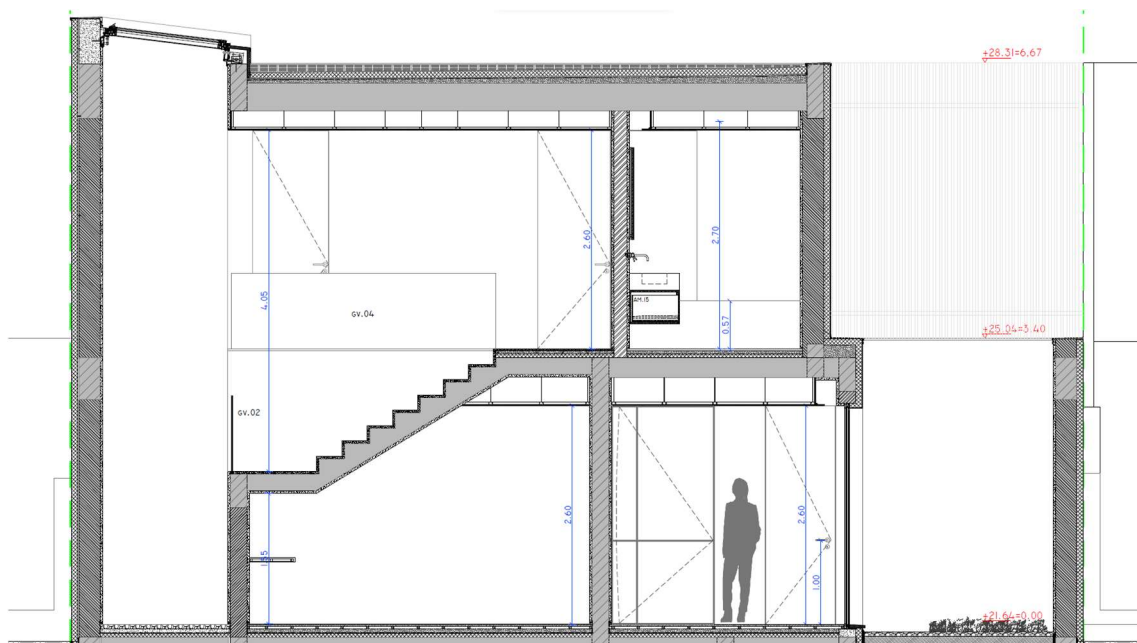


Imagem 47 - Corte 1



Imagem 48 - Corte 2

ANEXO 4

ALÇADOS

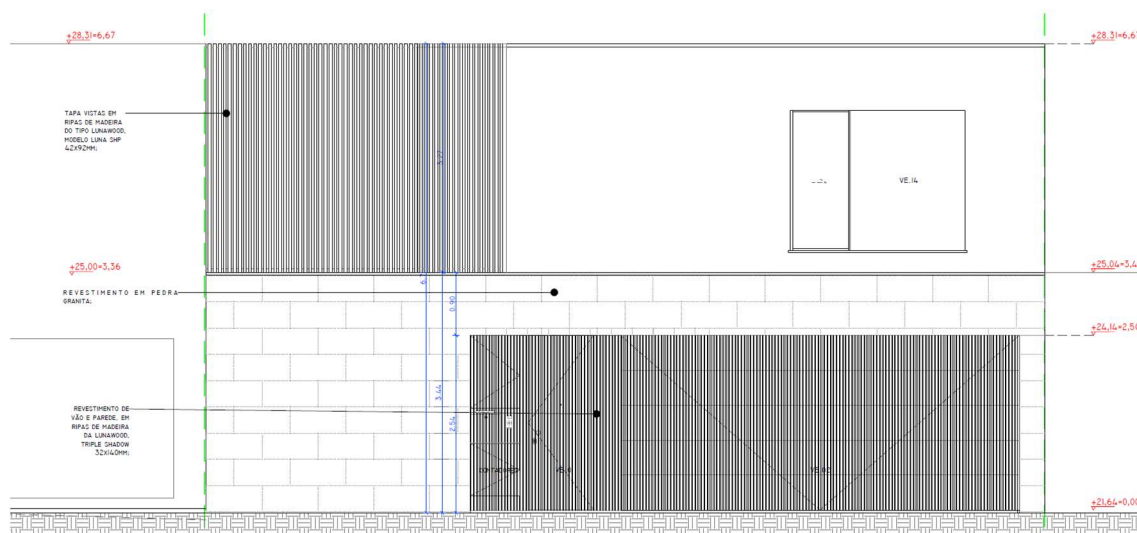


Imagem 49 - Alçado Principal

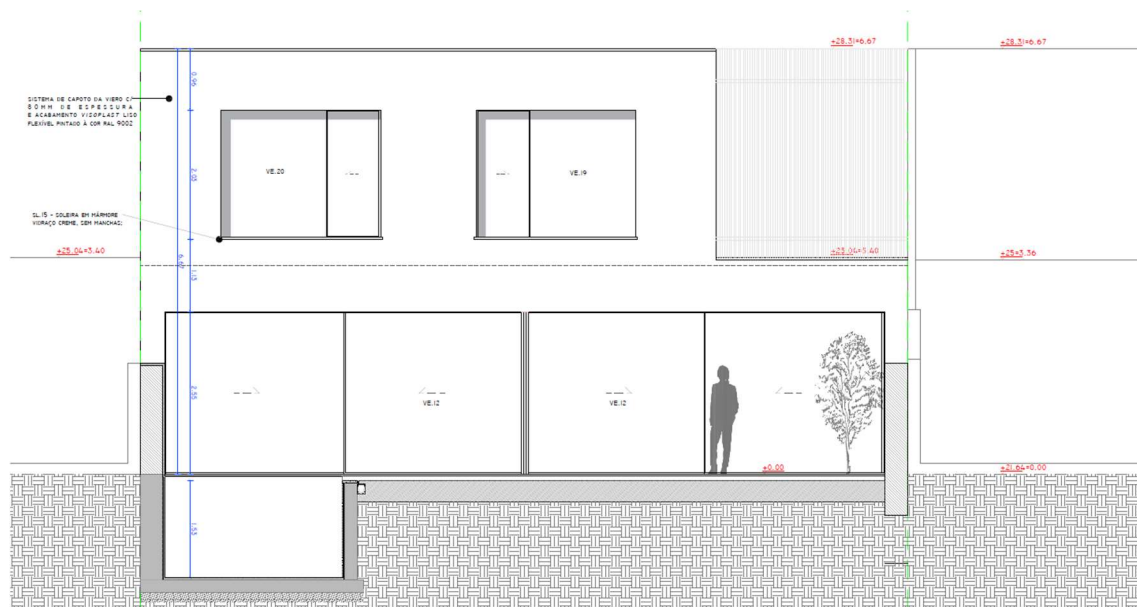


Imagem 50 - Alçado posterior