

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NATHÁLIA BARRETO DA SILVA

**O USO DE IMPRESSORAS 3D EM CONSTRUÇÕES NO BRASIL E NO
MUNDO**

MANAUS – AM

2023

NATHÁLIA BARRETO DA SILVA

**O USO DE IMPRESSORAS 3D EM CONSTRUÇÕES NO BRASIL E NO
MUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, apresentado como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr. Régis Pamponet da Fonseca

MANAUS – AM

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586u Silva, Nathália Barreto da
O Uso de Impressoras 3D em Construções no Brasil e no Mundo
/ Nathália Barreto da Silva . 2023
65 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Regis Pamponet da Fonseca
TCC de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do
Amazonas.

1. Concreto. 2. Impressão 3D. 3. Paredes de Concreto. 4. Estudo
Comparativo. 5. Produtividade. I. Fonseca, Regis Pamponet da. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, César e Carla, meu irmão, Pedro, minha avó, Onélia, e meu tio, Dário, que foram minha base durante toda a jornada da faculdade. Vocês fizeram o possível – e o impossível – para que eu chegasse até aqui hoje e sou eternamente grata por isso.

Ao meu namorado, Lucas Santos, que foi essencial desde que chegou na minha vida. Essa reta final não teria sido a mesma sem você do lado. Obrigada por acreditar em mim quando nem eu acreditava e obrigada por toda a ajuda, compreensão, companheirismo e apoio que você me deu.

Aos amigos que fiz na graduação, em especial à Isabella Neves, ao João Luiz, à Júlia Cervo e ao Mateus Ferreira, que foram as peças essenciais nos dias difíceis e as melhores companhias para compartilhar os dias incríveis. Apesar de ser desafiadora, com vocês, a faculdade foi muito mais leve.

Aos professores, que foram peça fundamental para minha formação. Um agradecimento especial ao meu orientador, professor Régis Pamponet, pela compreensão, paciência e por me ajudar e guiar rumo à conclusão desta monografia.

À universidade, que foi onde eu pude crescer, amadurecer e encarar os desafios e vitórias da vida real. Foi na UFAM que eu pude me moldar quanto profissional e é graças a ela que eu aprendi a perseverar mesmo nos momentos mais árduos.

A todos que ajudaram - ainda que indiretamente - para que eu pudesse me desenvolver pessoal e academicamente, fica aqui a lembrança e o reconhecimento.

Muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho conduziu um estudo da arte das impressoras 3D de concreto, desde o surgimento até as grandes máquinas e construções que já foram feitas ao redor do mundo. Além disso, foi feita uma análise bibliográfica para determinar os melhores parâmetros e características da mistura de concreto que será extrudada pelas impressoras. Os resultados mostram que misturas com valores entre 2 e 8mm, no slump test, e medidas entre 150 e 190mm, no flow test são as mais adequadas para esta metodologia (procedimentos de acordo com as normas norte-americanas).

Neste estudo também foram mostradas seis empresas (sendo cinco internacionais e uma nacional) e as tecnologias produzidas por cada uma delas, incluindo as construções realizadas e as suas particularidades. As análises incluíram, ainda, uma relação de processos que fazem parte do processo de impressão, como a etapa conceitual, a etapa técnica, a etapa operacional e de acabamento.

Em seguida, foi feita uma análise comparativa preliminar entre dois métodos de construção de casas: o tradicional uso de paredes de concreto e a inovadora tecnologia de impressão 3D de casas de concreto. O estudo foi conduzido a partir da elaboração de uma planta modelo de uma construção impressa em 3D pela Apis Cor, empresa norte-americana. A partir dessa planta, foram estimados dados de material e mão de obra que, em seguida, foram precificados utilizando a tabela SINAPI. Foram coletados dados para avaliar o custo de produção, o tempo de execução e a produtividade de ambos os métodos.

Finalmente, ainda que possua certas limitações, esta análise demonstrou uma redução de 53,86% no custo de produção de casas de concreto por meio da impressão 3D, uma diminuição de 94,8% no tempo de execução e uma produtividade 20 vezes maior. Além disso, a pesquisa apontou que, com a produção de cerca de 40 casas-modelo, o investimento na impressora se tornaria economicamente viável, destacando o potencial de retorno financeiro.

Palavras-chave: Concreto; Impressão 3D; Paredes de concreto; Estudo comparativo; Economia; Produtividade.

ABSTRACT

This work conducted a study of the state of the art of 3D concrete printers, from their inception to the large machines and constructions that have already been built around the world. Additionally, a bibliographic analysis was performed to determine the best parameters and characteristics of the concrete mixture that will be extruded by the printers. The results show that mixtures with values between 2 and 8mm in the slump test and measurements between 150 and 190mm in the flow test are the most suitable for this methodology (procedures according to North American standards).

In this study, six companies were also presented (five international and one domestic), along with the technologies produced by each of them, including the constructions carried out and their particularities. The analyses also included a breakdown of the processes that are part of the printing process, such as the conceptual stage, the technical stage, the operational stage, and finishing.

Subsequently, a preliminary comparative analysis was conducted between two methods of building houses: the traditional use of concrete walls and the innovative technology of 3D printing concrete houses. The study was conducted by creating a model plan for a 3D-printed construction by Apis Cor, an American company. Based on this plan, material and labor data were estimated, and then priced using the SINAPI table. Data were collected to assess the production cost, execution time, and productivity of both methods.

Finally, despite certain limitations, this analysis demonstrated a 53.86% reduction in the production cost of concrete houses through 3D printing, a 94.8% decrease in execution time, and a 20-fold increase in productivity. Furthermore, the research indicated that with the production of around 40 model houses, the investment in the printer would become economically viable, highlighting the potential for a financial return.

Keywords: Concrete; 3D Printing; Concrete walls; Comparative study; Economics; Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coliseu de Roma.....	12
Figura 2 - Catedral de Salisbury.....	13
Figura 3 - Fábrica com máquinas à vapor.....	15
Figura 4 - Produção em massa em fábrica durante a 2ª revolução industrial.....	16
Figura 5 - Fábrica com produção "robotizada", marco da 3ª revolução industrial.....	16
Figura 6 - Uso da inteligência artificial na produção.....	17
Figura 7 - Matriz de custo-benefício.....	18
Figura 8 - Interação entre economia x qualidade x produtividade relacionando ao setor da construção civil.....	19
Figura 9 - Máquina extrusora criada por Urschel.....	20
Figura 10 - Montagem das casas impressas pela WinSun.....	22
Figura 11 - Avanço das décadas até a impressão 3D.....	22
Figura 12 - Mistura para obtenção do concreto.....	24
Figura 13 - CyBe Robot, CyBe Robot Crawler e CyBe Robot Track, respectivamente	26
Figura 14 - CyBe Gantry Robot.....	27
Figura 15 - Possibilidades de montagem da Crane WASP.....	27
Figura 16 - Impressora Vulcan.....	28
Figura 17 - Impressora Frank.....	28
Figura 18 - Gary e Mary, respectivamente.....	29
Figura 19 - BOD 2.....	29
Figura 20 - Casa construída a partir da impressora criada pela InovaHouse3D e 3DHomeConstruction.....	30
Figura 21 - Definição da arquitetura a ser impressa.....	31
Figura 22 - Modelo estrutural adotado na Robust Villa.....	31
Figura 23 - Representação da impressão integrada de vergas e paredes.....	32
Figura 24 - Definição do modelo de parede.....	32
Figura 25 - Sequência de impressão da Robust Villa.....	33
Figura 26 - Representação da estrutura das vigas.....	33
Figura 27 - Esquema da estrutura das paredes.....	34
Figura 28 - Resultado externo da impressão da Robust Villa.....	35
Figura 29 - Resultado interno da Robust Villa.....	35
Figura 30 - UJ House: Primeira casa construída por impressão 3D da África do Sul....	36

Figura 31 - Genesis Collection	37
Figura 32 - Genesis Collection: Modelos	37
Figura 33 - Genesis Collection: Modelos	38
Figura 34 - Fachada da casa Ezra	38
Figura 35 - The BOD.....	39
Figura 36 - Planta Baixa da The BOD.....	39
Figura 38 - Casa construída pela WinSun	41
Figura 39 - Modelo 3D da casa do projeto Habita-se Maceió.....	41
Figura 40 - Planta baixa do complexo habitacional e espaços integrantes.....	42
Figura 41 - Casa impressa pela Apis Cor	43
Figura 42 - Planta baixa modelo da casa impressa pela Apis Cor.....	44
Figura 43 - Esquema de alturas da casa impressa pela Apis Cor	44
Figura 44 - Propriedades da impressora utilizada para construir a casa da Apis Cor	45

TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias de impressão e matéria prima	21
Tabela 2 - Resultados alcançados em 2019 com a reimpressão da The BOD.....	40
Tabela 3 - Resumo da precificação de cada etapa	47
Tabela 4 - Resumo do tempo de execução de cada etapa.....	47
Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos	48

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de casas impressas x Custo.....	50
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 Histórico do concreto.....	11
3.1.1 O concreto como elemento chave na construção civil	14
3.2 Indústria 4.0 e sua relação com o setor da construção.....	15
3.2.1 A tríade economia, qualidade e produtividade associada à indústria 4.0 e ao setor da construção civil.....	17
3.3 Impressoras 3D na construção civil.....	19
3.3.1 Concepção do modelo para a impressão em 3D.....	22
3.3.1.1 O formato STL	23
3.3.2 A mistura para uso em impressoras 3D	24
4 PRINCIPAIS MÁQUINAS E FABRICANTES	26
5 PROCESSO CONSTRUTIVO DAS EDIFICAÇÕES IMPRESSAS EM 3D.....	30
6 CONSTRUÇÕES FEITAS POR IMPRESSÃO 3D DE MISTURAS CIMENTÍCIAS.....	36
6.1 UJ House	36
6.2 The Genesis Collection.....	37
6.3 The BOD	39
6.4 10 casas em 24H – WINSUN	40
6.5 Habita-se Maceió – AL.....	41
7 COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA COM TÉCNICAS CONVENCIONAIS – PAREDES DE CONCRETO	42
7.1 Definição do layout de comparação	43
7.2 Casa de paredes de concreto	45

7.2.1 Memória de cálculo	45
7.2.2 Precificação	46
7.2.3 Tempo de execução	47
7.3 Casa impressa em 3D - Custo de impressão e tempo de execução	48
7.4 Resultados.....	48
8 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A.....	58
ANEXO B.....	62

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial é uma transformação tecnológica que está moldando diversos setores da economia global. A integração de sistemas virtuais, Internet das Coisas (IoT) e o uso de inteligência artificial desempenham um papel crucial na automação, otimização e eficiência dos processos industriais. Essa revolução não se limita apenas à manufatura, mas também impacta outros setores, incluindo a construção civil.

A capacidade de coletar e analisar dados em tempo real, juntamente com a automação avançada, permite uma produção mais inteligente e sustentável. Esse avanço da Indústria 4.0 é essencial para que o setor da construção civil se adapte às novidades do mercado e otimize seus processos. Além disso, a evolução das máquinas e a implementação da inteligência artificial podem ser atreladas ao conceito de construção enxuta - ou lean construction - que defende, principalmente, uma produção com poucas perdas, otimização de tempo (política do just in time) e redução da variabilidade dos padrões, que inclui aspectos como o material fornecido e a qualidade de execução (SILVA; PAIVA, 2017).

De acordo com Cardoso et al. (2022), a impressão 3D para a construção civil surge com a possibilidade de alinhar os conceitos defendidos do lean construction em um só equipamento, agregando valor à obra sem grandes interferências no custo ao consumidor final. As máquinas disponíveis variam em tamanho, componentes, materiais e processo de impressão (PORTO, 2016), dessa forma, é necessário estudar o cenário em questão para definir a melhor impressora 3D a ser utilizada, obtendo o ganho de produtividade esperado.

De acordo com Paim e Almeida (2018), essa tecnologia vem sendo difundida há anos e o top 3 de países com uma ampla margem de pesquisa e trabalhos sobre impressoras 3D somavam, juntos, 92% das patentes do mundo todo, sendo esses: Japão (1%), Estados Unidos (11%) e China (80%). Em 2015, os chineses já haviam construído o primeiro edifício do mundo utilizando a impressão 3D (O GLOBO, 2015). O edifício continha 5 andares, uma área de 1100m² e foi produzido com peças separadas que foram montadas no local da obra.

No Japão, em 2022, uma empresa foi capaz de fabricar – em menos de 24h – uma casa à base de impressão 3D (GAZETA, 2022). Era uma casa de 10m², no entanto, a

impressão durou cerca de 3h e o restante do tempo foi utilizado para instalação de esquadrias e impermeabilização. Por último, nos EUA, já em 2023, a empresa Hannah, em parceria com outras duas empresas, está construindo uma casa de dois pavimentos, somando cerca de 370m² de área construída (SERAGUSA, 2023). Essa casa, inclusive, combina tecnologias de wood frame e impressão em concreto para oferecer mais segurança contra furacões e tempestades (SERAGUSA, 2023).

No Brasil, o movimento em torno das máquinas para impressão 3D é mais tímido. Existem algumas pesquisas em torno do tema, mas poucas construções feitas com essa tecnologia. No Rio Grande do Norte, uma casa de 66,32m² foi construída em impressão 3D e com o custo de R\$50,00/m² (SANTOS, 2020), o que reforça o potencial econômico desse tipo de técnica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Fazer um estudo sobre a utilização de impressoras 3D na construção civil.

2.2 Objetivos específicos

- Catalogar os tipos de impressoras 3D utilizadas no Brasil e no mundo;
- Estudar o processo e desempenho de construções feitas com impressoras 3D;
- Comparar técnicas de construção usuais, em concreto armado, com a impressão 3D.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Histórico do concreto

O mundo desenvolvido tem o concreto como principal matéria prima para a construção. Em países como o Brasil, as construções feitas com concreto armado (CA) são muito valorizadas e, por isso, outros sistemas estruturais, principalmente o wood frame, têm dificuldades de se tornarem tão populares quanto o CA.

Contudo, o concreto não surgiu recentemente. Helene e Levy (2003 apud CEMBUREAU, 1995) citam que o concreto passou por vários marcos ao longo da história e esses marcos podem ser divididos da seguinte forma:

- Concreto antigo: 5000 a.C. – 100 a.C.;
- Concreto romano: 100 a.C. – 400 d.C.;
- Concreto medieval: 1200 d.C. – 1600 d.C.;
- Concreto da revolução industrial: 1600 d.C – 1800 d.C.;
- Concreto moderno: 1800 d.C. – atualmente.

De acordo com Helene e Levy (2003), o concreto mais antigo encontrado, data de 5600 a.C na Iugoslávia. Trata-se do piso de uma cabana, com 25cm de espessura, feito a partir de uma mistura de cal, argila e agregados. Helene e Levy também afirmam que, em 2500 a.C., a primeira pirâmide da cidade egípcia de Gizé, foi parcialmente construída com concreto.

O concreto romano é considerado o mais desenvolvido quando comparado com os concretos produzidos pelos outros povos da época. Isso porque as construções de alvenaria romanas são alvo de pesquisas pela sua durabilidade, estabilidade e porte. O Coliseu de Roma, apresentado como exemplo na figura 1, foi construído por volta de 80 d.C., possui paredes internas e fundações de concreto.

Figura 1 - Coliseu de Roma



Fonte: BBC News Brasil, 2022

Segundo Helene e Levy, depois da queda do Império Romano, as construções de concreto na Europa passaram a ser menos frequentes e, por volta de 1200 d.C., houve um resgate da cultura de fazer construções utilizando esse material, principalmente em fundações e estruturas. Nessa época, o concreto utilizado ficou conhecido por concreto medieval e um exemplo de construção feita com este material é a Catedral de Salisbury, na Inglaterra, apresentada na figura 2. (HELENE e LEVY, 2003).

Figura 2 - Catedral de Salisbury



Fonte: Arte fora do museu, 2020

Na Europa, em 1817, o engenheiro civil francês Louis Vicat descobriu o cimento hidráulico e este foi utilizado para a construção da ponte sobre o rio Dordogne (HELENE e LEVY, 2003 apud CEMBUREAU, 1995). Já em 1824, surge o cimento Portland, patenteado por Joseph Aspdin, resultado da queima de rochas calcárias com carvão.

Os autores contam que foi o desenvolvimento do Cimento Portland que possibilitou uma utilização mais frequente e abrangente do concreto, o autor cita também que esse foi o ponto de partida para que surgissem métodos construtivos inovadores e novas formas arquitetônicas como a primeira ponte de concreto armado do mundo, em Homersfield, Reino Unido, com cerca de 16,5m de vão.

Mas foi na França, no final do século XIX e início do século XX, que um engenheiro civil chamado François Hennebique, criou um sistema - conhecido por sistema Hennebique - que revolucionou a construção de estruturas de concreto, tornando-as mais eficientes e duráveis. A inovação foi o uso de estruturas de aço incorporadas ao concreto, resultando em elementos estruturais mais fortes e resistentes. Ele percebeu que, além das armaduras de tração, as estruturas precisavam das armaduras dobradas, prolongadas em diagonal, ancoradas na zona de compressão e dos estribos para absorver tensões do esforço cortante (ANDRADE, 2016 apud VASCONCELOS, 1985).

No entanto, apesar do sistema Hennebique de concreto ter sido um dos primeiros passos na direção da moderna construção de concreto armado, foi na Alemanha que surgiram as primeiras normas de dimensionamento e construção de estruturas em concreto armado. A partir daí, os ensaios experimentais relacionados ao concreto armado

foram aumentando e, com isso, surgiram patologias desconhecidas e que ainda não tinham solução, como no caso de pequenas trincas.

Por isso, M. Koenen propôs, em 1907, aplicar uma tensão prévia nas barras de aço para gerar tensões de compressão, o que deveria eliminar a tração no concreto e consequentemente, as fissuras. Esse seria o início do concreto protendido (ANDRADE, 2016).

3.1.1 O concreto como elemento chave na construção civil

Com a evolução da engenharia, surgem novos métodos construtivos que podem se tornar uma opção mais barata e até mais prática do que as convencionais estruturas de concreto. No entanto, esse método segue sendo o mais popular por razões como custo, adaptabilidade arquitetônica, resistência ao fogo, choque e vibrações, alto poder de conservação e impermeabilidade (BASTOS, 2023).

Existem, também, os impactos ambientais negativos gerados pelo uso do concreto na construção civil, que incluem até a emissão de CO₂. Porém, como forma de mitigar essas questões, é possível otimizar as construções em concreto armado (SANTORO, 2021). Segundo o autor, o processo de otimização inclui ações como a redução de peso ou custo da estrutura, aumento da eficiência de elementos estruturais, redução de perdas, plano de rotas de cargas e/ou passageiros, aumento da produtividade, definição da melhor mistura de componentes, entre outros. (SANTORO, 2021).

Como uma opção para estes pontos negativos, a indústria da construção civil buscou inovações na produção deste material, garantindo que suas propriedades mecânicas não fossem significativamente afetadas. Um exemplo é o concreto leve, que substitui agregados pesados por EPS e argila expandida e o concreto verde, que inclui material reciclado em sua composição. Quanto à concretagem de peças, também houveram ganhos significativos, como o uso do concreto autoadensável que, dentre várias particularidades, não exige o uso de vibração para ser nivelado, reduzindo o tempo e custo de execução, assim como o mais recente projeto da indústria, as impressoras 3D de concreto (3DCP).

A 3DCP é a aposta da indústria 4.0 para o setor da construção civil que promete revolucionar o mercado e agregar precisão, sustentabilidade, economia e rapidez às construções. Capaz de pôr em prática todas as indicações feitas por Santoro como, por exemplo, a redução de perdas e otimização da mistura de componentes. essas máquinas

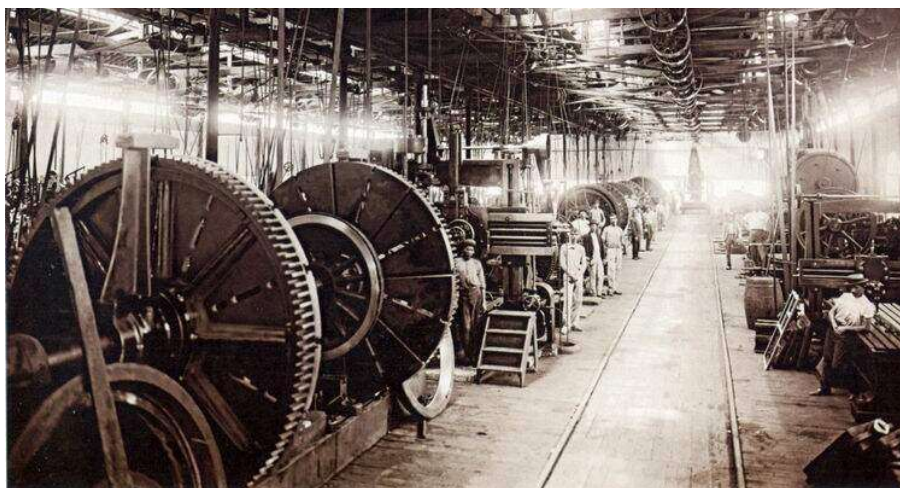
são equipamentos que combinam a tradição do concreto com a inovação da Indústria 4.0, possibilitando uma reformulação dos processos clássicos dentro construção civil de maneira mais eficiente e ecológica.

3.2 Indústria 4.0 e sua relação com o setor da construção

Ao longo da história, a sociedade vivenciou o surgimento de grandes invenções que, mais tarde, se tornaram essenciais. O homem foi capaz de observar as suas dores e necessidades e colocá-las em um papel, projetando e montando máquinas e equipamentos que pudessem solucionar – ou facilitar – seus problemas. Assim foram acontecendo as revoluções industriais.

A primeira revolução, que iniciou na Inglaterra no século XVIII e seguiu até meados do século XIX, foi a responsável por inserir as máquinas à vapor no sistema de produção industrial que conhecemos hoje (figura 3). Foi nesse momento que a produção artesanal deu espaço à produção fabril, época em que surgiram os dois principais sistemas de produção que são muito discutidos até os dias de hoje: o fordismo e o taylorismo (PASSOS, 2020).

Figura 3 - Fábrica com máquinas à vapor

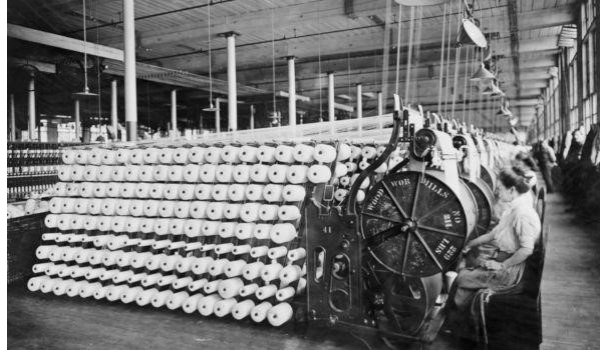


Fonte: MENDES, 2021

Em seguida, no século XIX até a metade do século XX, surgiu a segunda revolução industrial. Passos (2020) conta que foi durante essa época que a energia elétrica substituiu o uso do carvão e as fábricas colocaram em prática os sistemas de produção em larga escala, como mostra a figura 4. A terceira revolução industrial durou pouco tempo, começou e terminou no mesmo século (XX) e foi marcada pelo surgimento da produção automatizada. É nessa fase que o mundo das telecomunicações ganha espaço e se encaixa

no ritmo acelerado das grandes fábricas, que surgem as multinacionais e é nessa fase também que as indústrias eletrônica e robótica se destacam (figura 5).

Figura 4 - Produção em massa em fábrica durante a 2ª revolução industrial



Fonte: SOUSA, 2014

Figura 5 - Fábrica com produção "robotizada", marco da 3ª revolução industrial



Fonte: SOUSA, 2014

Finalmente, no início do século XXI, inicia a quarta revolução industrial, também chamada de indústria 4.0. Essa é uma fase marcada pelo surgimento e aperfeiçoamento de novas tecnologias como o uso de nuvem, inteligência artificial e outros. Para a construção civil, essa nova era foi responsável por gerar impactos mais positivos e que impulsionaram o setor, como os drones, a realidade virtual (VR), realidade aumentada (VA) (figura 6) e o building information modeling (BIM), este último sendo - provavelmente - o seu maior acerto.

O BIM é uma abordagem que permite criar uma rede colaborativa entre todos os envolvidos nos processos de uma construção. Com ele, a equipe consegue gerar modelos digitais e em 3D, além de combinar projetos a fim de enxergar possíveis gargalos que só seriam detectados durante a execução. Esse sistema ainda melhora o planejamento, ajuda

a fazer orçamentos de forma mais automatizada e precisa e ainda é capaz de otimizar a gestão de produtos. Um exemplo de software muito popular e que está intrinsecamente ligado ao BIM é o Revit.

O Revit, assim como outros softwares, permite criar uma maquete virtual com várias camadas de detalhe. Com ele, o projetista é capaz de enxergar claramente o que está sendo desenhado e pensado para a construção. O programa também é um facilitador no dimensionamento de grandes estruturas já que, com as ferramentas adequadas, é possível fazer cálculos complexos que demoram muito caso sejam feitos manualmente. Um exemplo é o dimensionamento de estruturas de concreto armado, como as grandes pontes e edifícios.

De maneira geral, a indústria 4.0 chegou buscando otimizar a produtividade dos diversos setores, ajudando a manter - e até aumentar - a qualidade na entrega dos produtos e gerando impactos positivos na economia.

Figura 6 - Uso da inteligência artificial na produção



Fonte: ARAÚJO, 2015

3.2.1 A tríade economia, qualidade e produtividade associada à indústria 4.0 e ao setor da construção civil

O segredo do sucesso de qualquer empreitada, principalmente dentro da construção civil, gira em torno da relação entre qualidade, produtividade e economia. De acordo com a NBR ISO 9000 (2015), a qualidade de um produto ou serviço é algo de caráter subjetivo por estar intimamente ligada aos critérios de julgamento do cliente que pode, ou não, perceber algum valor agregado neste.

A qualidade dos produtos e serviços de uma organização é determinada pela capacidade de satisfazer os clientes e pelo impacto pretendido e não pretendido nas partes interessadas pertinentes. A qualidade dos produtos e serviços inclui

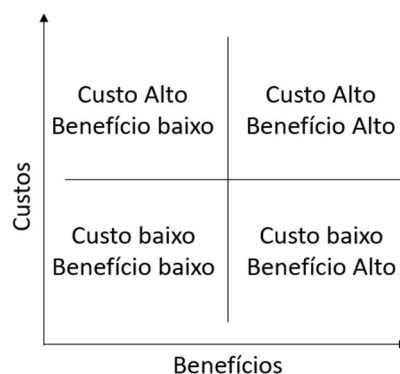
não apenas sua função e desempenho pretendidos, mas também seu valor percebido e o benefício para o cliente. (NBR ISO 9000, 2015, p. 08)

De acordo com o Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getúlio Vargas, a produtividade é uma forma de medir a eficiência dos fatores de produção de uma empresa, setor ou país. Segundo Moraes (2019 apud ERNST & YOUNG, 2014) o aumento da produtividade da construção civil depende de fatores como:

- Utilização de métodos de gestão e métodos construtivos;
- Melhorias de projeto;
- Planejamento de empreendimentos;
- Qualificação da mão de obra, equipamentos e materiais.

Para que existam melhorias e qualificações, é necessário um certo investimento financeiro. Nestas situações, busca-se, através da economia, o equilíbrio entre os custos e benefícios do tal investimento. A matriz da figura 7 ilustra a relação entre esses dois aspectos.

Figura 7 - Matriz de custo-benefício



Fonte: Autor, 2023

A análise custo benefício (ACB) é um conjunto de técnicas que fundamenta a tomada de decisão, avaliando se uma intervenção acarretará, ou não, ganhos à sociedade (STIVALI e MATTEI, 2023). Para tal estudo, são considerados seus efeitos (custos e benefícios) sobre todos os afetados, levando em conta consequências diretas e indiretas, privadas e externas (STIVALI e MATTEI, 2023). Essa análise, inclusive, não se limita a aspectos relacionados à moeda e pode se estender à estudos relacionados a prazos, qualidade etc.

Na ACB, em princípio, não importa como benefícios e custos são apropriados pela sociedade. Para a regra de decisão, nesse caso, benefícios e custos podem ser atribuídos a grupos diferentes, bastando o resultado líquido ser positivo para a aprovação de um projeto. A ACB padrão se preocupa apenas com

ganhos de eficiência econômica, sem considerações sobre equidade. (STIVALI e MATTEI, 2023, p. 06)

Vistas as definições, nota-se certa interdependência entre estes aspectos e, correlacionando ao setor da construção civil, afirma-se que:

- a) **Sobre a relação economia x qualidade:** equilibrar estas duas vertentes significa escolher materiais e técnicas adequados (ainda que isso represente gastos um pouco mais elevados em um primeiro momento), mas que reduzam custos a longo prazo.
- b) **Sobre a relação qualidade x produtividade:** optar pela segurança, estética, funcionalidade e dedicação ímpar na execução de um serviço é uma forma de evitar retrabalhos e obter um ganho de produção.
- c) **Sobre a relação economia x produtividade:** com a adoção de métodos construtivos inteligentes e fazendo bom uso da tecnologia, haverá um lucro notável que pode atingir desde os processos internos até o setor financeiro.

A figura 8, a seguir, resume as questões supracitadas.

Figura 8 - Interação entre economia x qualidade x produtividade relacionando ao setor da construção civil



Fonte: Autor, 2023

3.3 Impressoras 3D na construção civil

Segundo Lima e Gomes (2020), na indústria 4.0, as tecnologias podem ser agrupadas de três formas diferentes: tecnologias biológicas, com o exemplo da biotecnologia e genética; tecnologias digitais, com o uso de artifícios como a internet das

coisas (IoT), big data e a tecnologia blockchain e, por último, tecnologias físicas, com a popularização de veículos autônomos, novos materiais, robótica avançada e impressão 3D, criada pelo engenheiro estadunidense Charles Hull (também conhecido como Chuck Hull) por volta de 1983 e que se destaca pela praticidade e aplicabilidade dentro de diversos setores, incluindo o da construção civil.

Falar de economia, qualidade e produtividade é sinônimo de falar sobre impressoras 3D. Formiga e Carneiro (2020) citam como elementos principais da impressão 3D a redução de trabalho manual, redução do tempo de obra, redução de custos, maior liberdade arquitetônica e impacto sustentável, com a redução significativa de perdas. Essa tecnologia vem sendo trabalhada desde o final dos anos 30. William E. Urschel foi o responsável por criar o que seria a primeira impressora 3D do mundo em Valparaiso, Indiana, EUA. Em 1940, Urschel deu entrada em várias patentes para registrar sua “máquina de construção de paredes”, apresentada na figura 9 (CURTH, 2022).

Figura 9 - Máquina extrusora criada por Urschel



Fonte: CURTH, 2022

Após Urschel, as técnicas de impressão foram avançando, no entanto, eram direcionadas à impressão por jato de tinta, a impressão convencional que conhecemos e vemos no dia a dia de muitos escritórios. A impressão 3D só voltou a ganhar destaque nos anos 80. Silva (2022) conta como Hideo Kodama, doutor do Instituto de Pesquisas de Nagoya, no Japão, tentou patentear um sistema de impressão 3D a laser utilizando polímeros termoplásticos. No entanto, Kodama não conseguiu a aprovação a tempo.

Em 1984, Charles Hull foi o responsável por criar o primeiro dispositivo de impressão 3D utilizando uma técnica chamada estereolitografia ou SLA e este foi devidamente patentado em 1988 (SILVA, 2022). Já em 1989, de acordo com Filho (2020), Scott Trump desenvolveu uma nova tecnologia chamada Fused Deposition

Modeling (FDM), um método de extrusão que recorre a um filete termoplástico sendo depositado em camadas para gerar uma impressão em 3D (SILVA, 2022).

Partindo disso, a indústria foi capaz de criar diversas máquinas e com aplicações variadas, como mostra a tabela 1. Surgiram as impressoras 3D de órgãos, impressoras 3D de materiais plásticos, entre outros.

Tabela 1 - Tecnologias de impressão e matéria prima

Método	Tecnologia	Materiais Utilizados
Extrusão	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Termoplásticos (Polilactídeo - PLA, Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS etc.)
Pó	Sinterização direta a laser de metais (DMLS)	Praticamente todas as ligas metálicas
	Fusão de feixe de elétrons (EBM)	Ligas de titânio
	Derretimento Seletivo a Laser (SLM)	Ligas de titânio, ligas de cromo-cobalto, aço inoxidável, alumínio
	Sinterização seletiva por calor (SHS)	Termoplásticos em pó
	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Termoplásticos, pós metálicos, pós cerâmicos
Jet	Impressão 3D a jato de tinta (3DP)	Gesso, plásticos, pós metálicos, misturas de areia
Laminação	Produção de objetos pelo método de laminação (LOM)	Papel, folha de metal, filme plástico
Polimerização	Estereolitografia (SLA)	Fotopolímeros

Fonte: Filho, 2020 apud Volpato et. Al, 2017

Nos anos 90, a universidade da Califórnia criou uma impressora, que também funcionava por extrusão, chamada Contour Crafting (FORMIGA e CARNEIRO, 2020). Essa máquina foi pensada, inicialmente, para trabalhar com a extrusão de pasta de cerâmica, no entanto, evoluiu para que trabalhasse com materiais cimentícios e é capaz de gerar impressões de acordo com os eixos x, y e z, os eixos cartesianos (FORMIGA e CARNEIRO, 2020). Alguns anos depois, nos anos 2000, surge a D-Shape, uma máquina que utiliza a deposição de pó juntamente com a aplicação de um material ligante e que é bastante eficiente na impressão de estruturas em larga escala (FORMIGA E CARNEIRO, 2020).

Avançando para os anos 2010, a indústria da construção civil já se via em uma corrida para oficializar alguma construção utilizando a técnica de impressão 3D, como foi o caso da empresa chinesa WinSun, a primeira empresa do mundo a imprimir uma construção em 3D. A figura 10 mostra o projeto da companhia que, em 2014, construiu 10 casas em 24 horas utilizando uma impressora de materiais cimentícios para pré-fabricar as peças e montar no local. (CARBONARI et al, 2023 apud WALKER, 2014).

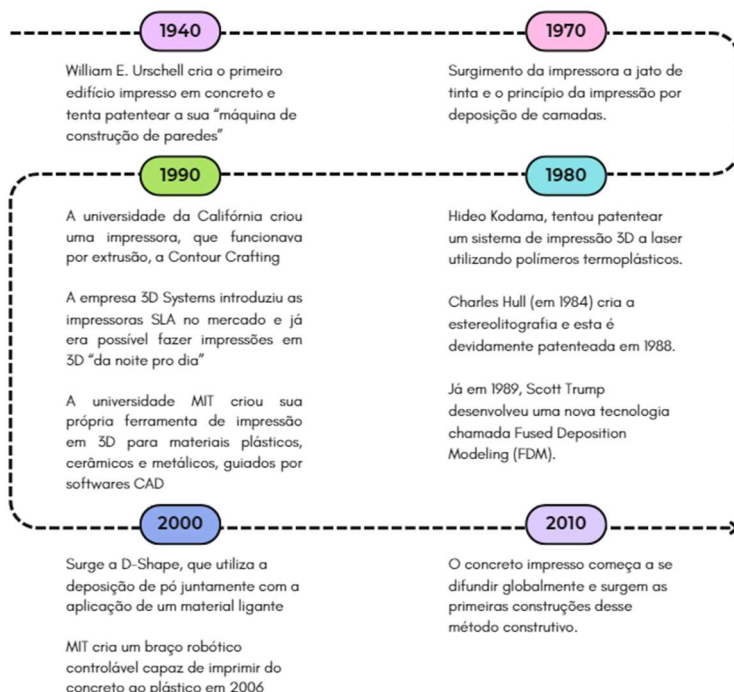
Figura 10 - Montagem das casas impressas pela WinSun



Fonte: WALKER, 2014

Desde então, surgiram várias construções cada vez mais robustas como pontes impressas em 3D na Espanha e Alemanha (esta última, impressa com metal), bairros planejados nos EUA, impressões 3D utilizando areia como matéria prima e outras aplicações inovadoras, a figura 11 demonstra a evolução dessa técnica ao longo das décadas.

Figura 11 - Avanço das décadas até a impressão 3D



Fonte: Adaptado de Montjoy, 2023

3.3.1 Concepção do modelo para a impressão em 3D

Em geral, a concepção do modelo inicia na definição do material que será utilizado para a impressão e da máquina utilizada (PERROT, 2019). Isso porque esses dois aspectos

e suas limitações são determinantes para escolher o melhor sistema estrutural e o layout da arquitetura. Este layout deve ser bem pensado e bem definido, feito em um modelo 3D no software da impressora que será utilizada, se houver tal função, ou nos softwares disponíveis no mercado como AutoCAD, Revit, SketchUp e outros. Segundo o autor, esses modelos feitos em sistemas que não sejam exatamente compatíveis, posteriormente, devem ser exportados para o formato STL, que é suportado pelas impressoras.

De acordo com Perrot (2019), o ciclo de design e impressão pode ser simplificado da seguinte forma:

- Criação de um modelo 3D com a representação digital do que será criado, já que a impressão em 3D está diretamente ligada ao design digital de peças e estruturas;
- Geração de um arquivo em formato dedicado (STL) contendo todas as informações geométricas necessárias para representar o modelo digital;
- Conversão do modelo digital em uma lista de comandos que a impressora 3D possa compreender e realizar;
- Estabelecimento de uma lista de instruções fornecidas à impressora através de um sistema de partilha de dados;
- Impressão
- Acabamento com a extração de peças provisórias e a adição de peças de acabamento não imprimíveis, se for o caso.

3.3.1.1 O formato STL

Esse é um tipo de arquivo utilizado na impressão 3D que é composto de uma série de triângulos (ou mosaicos) que representam a geometria do modelo e a posição, uma vez que é a partir dele que a máquina lê as coordenadas de impressão. De acordo com ADOBE, empresa multinacional que trabalha no setor de desenvolvimento de softwares, quanto mais complexo o projeto, mais triângulos são utilizados e maior a resolução.

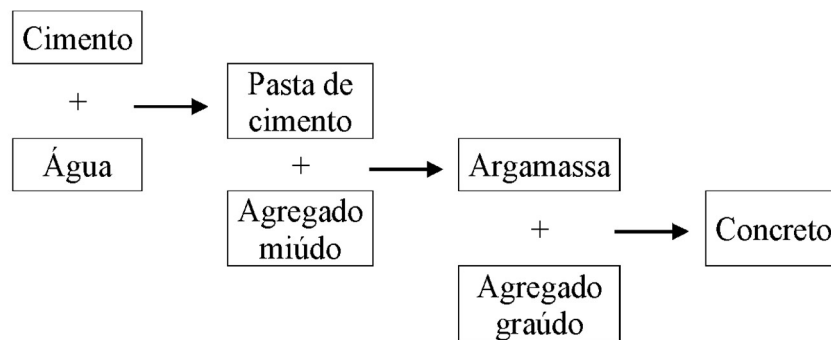
No entanto, a empresa cita que, apesar de popular, esse formato de arquivo possui prós e contras. Como vantagens, a ADOBE destaca que os arquivos STL são confiáveis, compatíveis com uma gama de impressoras e, em geral, não são arquivos pesados, já que não são capazes de reproduzir cor e textura. Inclusive, a falta desses dois aspectos (cor e textura), junto da sua incapacidade de armazenar metadados (autoria, direitos autorais e localização) são pontos negativos do uso desse formato.

Por isso, apesar do STL ser o formato de arquivo mais comum para impressão 3D, algumas pessoas optam por outros formatos menos populares, mas que também podem ser compatíveis, como o OBJ, VRML e PLY.

3.3.2 A mistura para uso em impressoras 3D

O primeiro ponto a ser discutido é se os materiais extrudados por estas impressoras são, ou não, concreto. Sabe-se que a mistura de cimento, água e agregado miúdo forma a argamassa, enquanto a argamassa somada à agregados graúdos, forma o concreto, como demonstra o fluxograma da figura 12.

Figura 12 - Mistura para obtenção do concreto



Fonte: Autor, 2023

A NBR 7211 (2022) define que a classificação do tipo de agregado varia de acordo com o seu diâmetro e este, por sua vez, é determinado no ensaio de granulometria. De acordo com a norma brasileira, materiais de diâmetros menores ou iguais à 4,8mm são considerados agregados miúdos e aqueles com diâmetros superiores a este valor (4,8mm) são agregados graúdos. A norma norte americana ASTM C33 define os mesmos limites para os agregados, no entanto, não foram encontradas normas específicas que definissem de forma clara a diferença entre argamassa e concreto com base nesse quesito, apenas com base na proporção dos componentes da mistura e sua aplicação.

Assim, considerando que grande parte das pesquisas sobre impressão 3D de concreto são realizadas no exterior e considerando que as principais máquinas do mercado também não são nacionais, é comum se deparar com alguns websites de fabricantes expondo máquinas capazes de imprimir misturas que, ao menos no Brasil, seriam apenas argamassa. Por isso, ao estudar as impressoras disponíveis, é essencial entender mais sobre a mistura adotada por cada empresa e o diâmetro do agregado que será extrudado.

Existem cinco tipos de brita (agregado graúdo), cada um em uma faixa de tamanho. Para concretos, o mais usual é utilizar britas do tipo 0 ou 1, já que são menores e, portanto, mais fáceis de manipular. Sendo assim, agregados com diâmetros entre 4,8mm e 25mm poderiam ser facilmente utilizados nas impressoras 3D, desde que a extrusora suporte estes tamanhos.

Em todo caso, o material a ser impresso, sendo concreto ou argamassa, deve obedecer a certos requisitos para que a construção tenha um bom desempenho. Até o momento, os tais requisitos não seguem uma norma exclusiva para impressão 3D de concreto, no entanto, as normas nacionais e internacionais de concreto convencional podem ser um ponto de partida para a análise dessas misturas. De acordo com Filgueira et al (2021), esse material deve ser rígido o suficiente para garantir a estabilidade das impressões feitas. O material cimentício deve ter fluidabilidade, extrudabilidade e trabalhabilidade, quando observado o estado fresco, além de densidade e resistências – flexão, tração, retração, fissuramento – adequadas, quando observado o estado endurecido (FILGUEIRA et al, 2021 apud ZHANZHAO et al, 2020).

Com base na pesquisa de Tay et al (2019), Khan et al (2023) explica como o slump test e flow test são ensaios importantes para chegar às características de um concreto ideal já que, partindo destes ensaios, foi possível obter as seguintes conclusões:

- As proporções de água/cimento e areia/cimento têm maior influência do que as proporções de aditivo/cimento nas medições do slump e flow test;
- Aumentar a proporção de agregado/cimento aumenta o atrito entre os agregados e dificulta o escoamento;
- Uma diminuição significativa nos valores de abatimento aumenta a rugosidade do concreto impresso, evidenciando fissuras que podem levar à uma menor resistência entre camadas ou ao enfraquecimento/falha da estrutura. Por outro lado, se o valor do abatimento for alto, a peça terá menos vazios e uma estabilidade reduzida, devido à diminuição da tensão de escoamento;

Khan (2023 apud TAY et al, 2019) cita que misturas de concreto com valores entre 2 e 8mm, no slump test, e medidas entre 150 e 190mm, no flow test, são considerados aceitáveis. Ressalta-se que os procedimentos adotados nestes ensaios foram de acordo com as normas estadunidenses ASTM C230 e ASTM C1437.

4 PRINCIPAIS MÁQUINAS E FABRICANTES

Com a popularização da técnica de impressão 3D de concreto na indústria da construção civil, grandes empresas têm entrado em uma corrida para desenvolver máquinas inovadoras e cheias de funcionalidades que possam viabilizar, cada vez mais, esse tipo de construção. A CyBe Construction é uma empresa holandesa que surgiu em 2013 e iniciou os trabalhos criando um concreto que fosse imprimível, o CyBe Mortar®. De acordo com a empresa, esse concreto pode ser impresso a velocidades de até 0,6m/s, em camadas que variam de 1cm a 5cm e que podem ser “empilhadas” em um intervalo de 5 segundos. A CyBe cita também que o seu concreto, Mortar, leva apenas 3 minutos para endurecer e cerca de 1 hora para atingir sua resistência estrutural.

Atualmente, a CyBe Construction possui 4 máquinas principais, onde três delas, representadas na figura 13, são impressoras de braço mecânico (CyBe Robot - R, CyBe Robot Crawler - RC e CyBe Robot Track - RT) e uma é em estrutura de pórtico (CyBe Gantry Robot - GR). As impressoras CyBe R, RC e RT são compactas e funcionam a partir do conceito de pré-fabricação e estrutura modular. Elas são capazes de produzir peças individuais com a máquina estacionária (R), em uma pista de rolamento de 5m de comprimento (no caso da CyBe RT) ou em uma estrutura elevada e móvel para alcançar maiores alturas e obter mais dinamismo na produção (CyBe RC). De acordo com o fabricante, as impressoras possuem tamanho padrão de 5m de comprimento, 2,5m de largura e 4m de altura e todas funcionam a uma velocidade de 0,5m/s.

Figura 13 - CyBe Robot, CyBe Robot Crawler e CyBe Robot Track, respectivamente

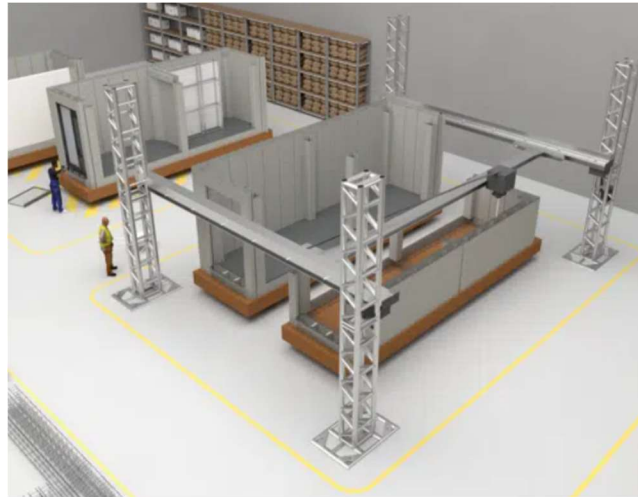


Fonte: CyBe Construction, 2023

A máquina em estrutura de pórtico da CyBe Construction, CyBe GR (figura 14), é uma impressora 3D estacionária de grande escala composto por 6 colunas e 3 vigas e pesando cerca de 13 toneladas. É ideal para impressão de apartamentos modulares e acabados em ambiente de fábrica que, posteriormente, podem ser montadas no local. A

GR opera a uma velocidade de 0,5m/s para movimentos horizontais, 0,04m/s para movimentos verticais e possui 7m de comprimento, 10m de largura e 4m de altura.

Figura 14 - CyBe Gantry Robot

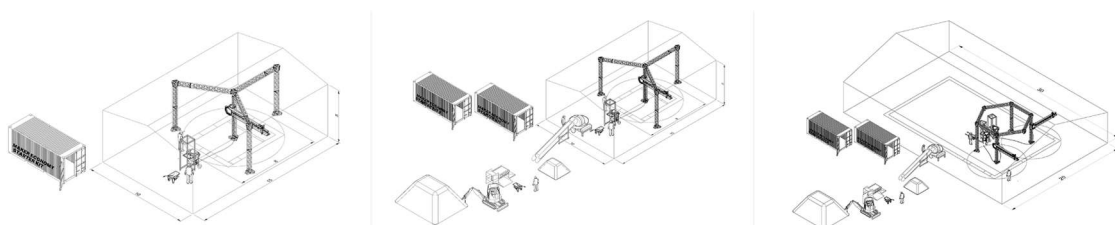


Fonte: CyBe Construction, 2023

Outra empresa do ramo é a italiana WASP, que criou a Big Delta, com 12m de altura e 7m de largura, mas que só fazia impressões com blends de fibras. Em 2018, a empresa criou a Crane WASP, uma impressora que trabalha com materiais como geopolímeros e o Mortar em velocidades de impressão que variam entre 0,3 e 0,5m/s, que consegue imprimir misturas com agregados de até 30mm (portanto, imprime concretos), além de possuir um volume de impressão de cerca de 94m³.

A Crane WASP é um sistema de impressão 3D que se inspira nos clássicos guindastes de construção. Ela é composta por uma unidade de impressão que pode ser montada em diferentes configurações dependendo da área de impressão e das dimensões da arquitetura a ser impressa, conforme a demonstração da figura 15.

Figura 15 - Possibilidades de montagem da Crane WASP



Fonte: WASP, 2023

Além destas, a startup norte-americana ICON, criou a Vulcan (figura 16), uma máquina com 4,72m de altura e 14,12m de comprimento. A Vulcan possui um sistema construtivo constituído pela própria impressora (Vulcan) e pela unidade misturadora

portátil, Magma, que prepara o próprio material de impressão, o Lavacrete, um concreto bactericida com resistência que varia entre 14MPa e 25MPa. A impressora é comandada pelo software BuildOS[®], capaz de gerar e preparar a arquitetura a ser impressa, além de possibilitar um maior controle para que o usuário possa transformar projetos digitais em casas físicas. Além disso, a Vulcan é capaz de imprimir construções de até 278m² sem necessitar de realocação.

Figura 16 - Impressora Vulcan



Fonte: ICON, 2023

A Apis Cor, outra empresa norte-americana, criou um conjunto de máquinas que inclui a impressora 3D, Frank (figura 17), a unidade de bombeamento, Gary, e a unidade de transporte de material e mistura, Mary (figura 18). Os três equipamentos são compactos e fáceis de operar, garantindo uma produtividade 3x maior do que os métodos convencionais e qualidade na entrega da construção que será impressa, com um concreto 33% mais resistentes do que os blocos estruturais.

Figura 17 - Impressora Frank



Fonte: Apis Cor, 2023

Figura 18 - Gary e Mary, respectivamente



Fonte: Apis Cor, 2023

Outra empresa que se destaca no ramo é a dinamarquesa COBOD, responsável por criar a BOD2, apresentada na figura 19. Esta é uma impressora no formato de treliça que pode mudar de tamanho e configuração para se adequar ao projeto que será impresso. A impressora é capaz de trabalhar em uma velocidade que varia entre 0,25m/s e 1m/s (dependendo do sistema de bico/extrusora utilizado), requer cerca de 3 a 4 trabalhadores e imprime em superfícies irregulares, fazendo uma correção automática da espessura para reparar os desníveis. Segundo a empresa, a extrusora é capaz de imprimir concretos com agregados de até 10mm.

Figura 19 - BOD 2



Fonte: COBOD, 2023

No Brasil, a maioria das empresas que desenvolvem pesquisas e estudos com as impressoras 3D de concreto, utilizam máquinas importadas. No entanto, a InovaHouse3D (startup criada por alunos da Universidade Potiguar - UnP), e a parceira 3DHomeConstruction, foram capazes de desenvolver a primeira máquina de impressão 3D de concreto da América Latina. O equipamento, apresentado na figura 20, possui 3m

de altura, 7,6m de largura, 12m de comprimento e é capaz de imprimir construções de até 200m².

Figura 20 - Casa construída a partir da impressora criada pela InovaHouse3D e 3DHomeConstruction



Fonte: CUNHA, 2020.

Todas essas máquinas foram criadas para que pudessem acelerar e facilitar o ritmo de produção da construção civil. Outro ponto muito discutido por todas as empresas é que, com essas impressoras, as desigualdades sociais devido à moradia poderão ser mitigadas e, por isso, as empresas buscam produzir construções que tenham baixo impacto ambiental e que se enquadrem nos padrões de habitação popular.

5 PROCESSO CONSTRUTIVO DAS EDIFICAÇÕES IMPRESSAS EM 3D

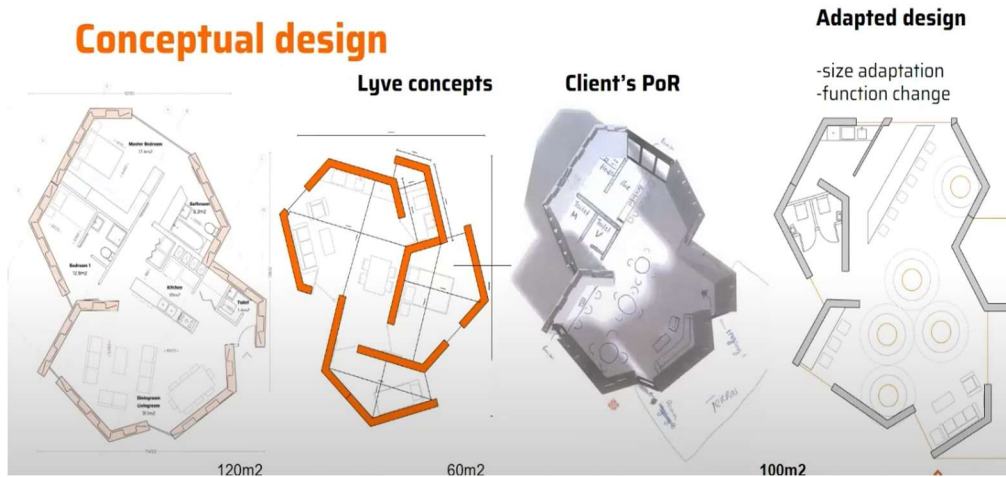
A construção de casas utilizando a tecnologia de impressão 3D é um processo muito particular que varia de acordo com o porte da estrutura e impressora utilizada. Devido à diversidade de máquinas disponíveis no mercado é difícil definir um só processo construtivo, no entanto, é possível utilizar a Robust Villa, impressão da CyBe Construction feita com a CyBe RC para ilustrar algumas fases principais da operação e que são comuns às impressoras do mercado.

Fase 1 – Conceitual

Essa etapa foi pensada como um momento de entender as necessidades do cliente e as possibilidades de impressão. Um ponto sobre as impressoras 3D é que elas trabalham fazendo uma espécie de romaneio do que será impresso, por isso, como uma forma de otimizar a construção e obter ganho de material e tempo, a empresa sugeriu que a

construção fosse impressa utilizando um único modelo de parede. A figura 21, a seguir, mostra as definições adotadas para essa construção.

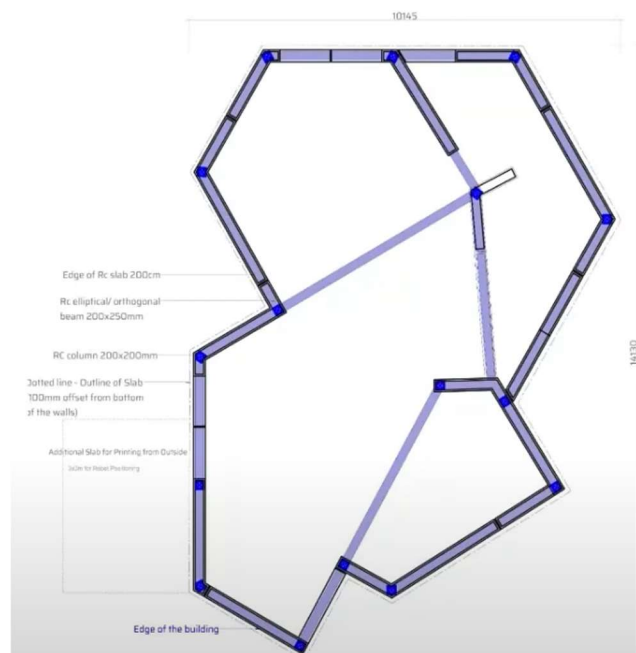
Figura 21 - Definição da arquitetura a ser impressa



Fonte: CyBe Construction, 2023

Nessa etapa também é definido o sistema estrutural, como mostra a figura 22. Para este projeto, a CyBe optou por uma construção em concreto armado e fez uma planta com a locação dos pilares da construção, representados pelos pontos em azul escuro na figura 22.

Figura 22 - Modelo estrutural adotado na Robust Villa

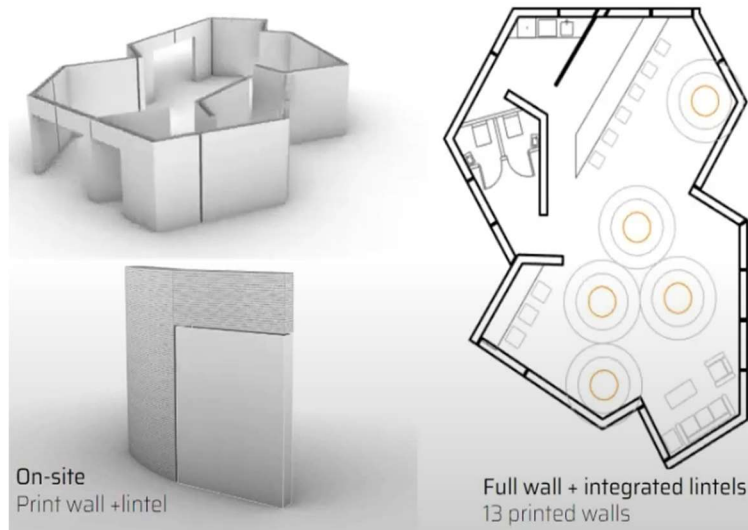


Fonte: CyBe Construction, 2023

Outro ponto é referente aos vãos de portas e janelas, que requerem uma atenção especial pela necessidade de vergas e contravergas. Nesse caso, a empresa optou por fazer

a impressão de forma integrada às paredes (figura 23), no entanto, durante a impressão, seriam adicionadas pequenas tábuas de madeira com comprimentos maiores que os vãos que serviriam como uma espécie de suporte às vergas que seriam impressas.

Figura 23 - Representação da impressão integrada de vergas e paredes

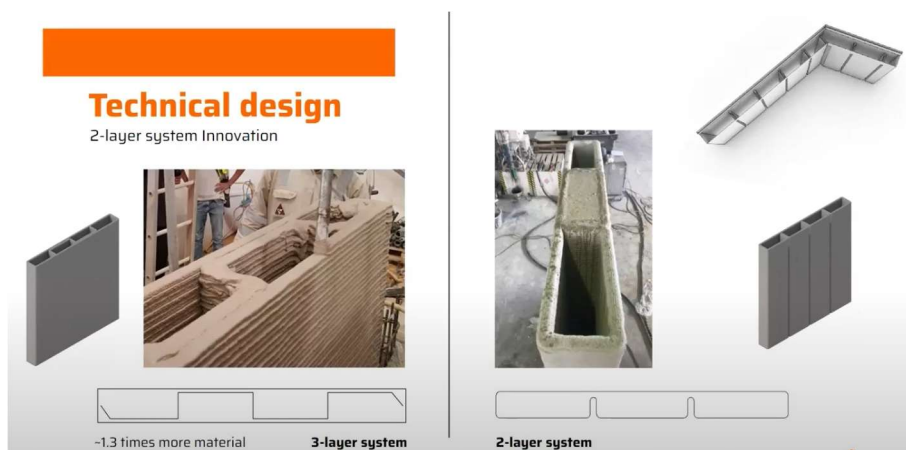


Fonte: CyBe Construction, 2023

Fase 2 – Técnica

Nessa etapa, os pesquisadores desenvolveram uma outra forma de economizar material e tempo de impressão: imprimir paredes de apenas duas camadas (figura 24, à direita). Houve uma discussão por achar que a parede sem o preenchimento central não teria rigidez o suficiente, no entanto, após alguns estudos, o setor de engenharia estrutural da empresa aprovou a modificação

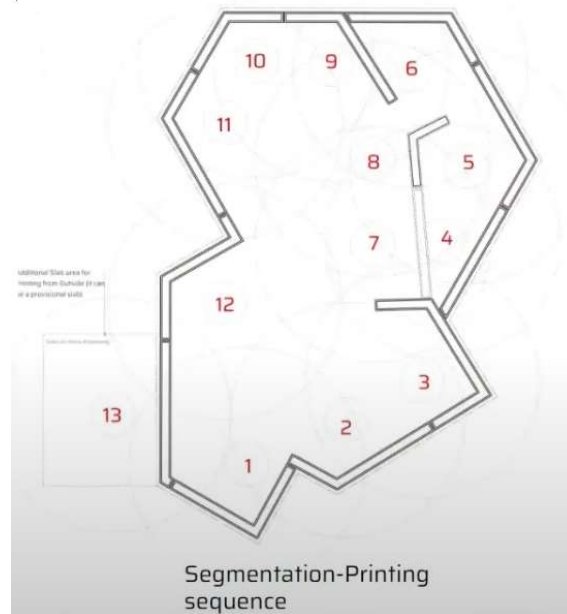
Figura 24 - Definição do modelo de parede



Fonte: CyBe Construction, 2023

Também é na fase técnica que é pensado um jeito de imprimir toda a construção sem que a impressora fique presa. Por isso, a CyBe desenvolveu uma sequência de impressão, como mostra a figura 25, a seguir.

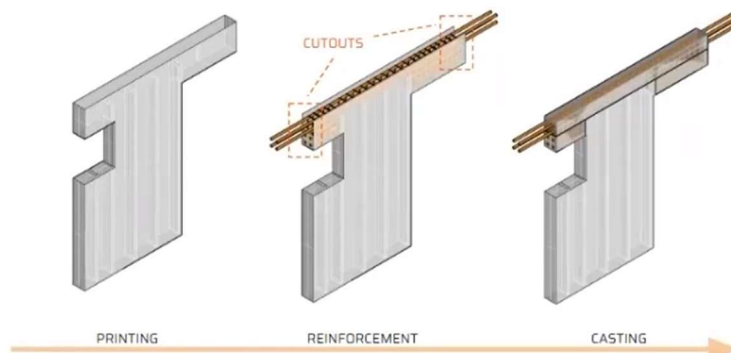
Figura 25 - Sequência de impressão da Robust Villa



Fonte: CyBe Construction, 2023

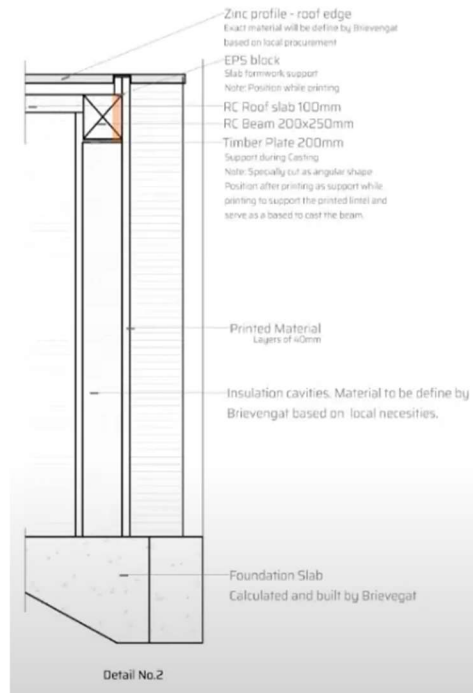
Quanto à estrutura da parede, a CyBe definiu que a construção ficaria apoiada em um radier e que as duas camadas de concreto impresso ficariam separadas por um vão que poderia, ou não, ser preenchido com algum material isolante, definido pelo cliente de acordo com as necessidades locais. Em relação à superestrutura, a empresa optou por fazer um suporte das vigas utilizando tábuas de madeira, as formas seriam feitas com EPS, a armação seria posicionada e, posteriormente, as vigas seriam preenchidas com o concreto impresso. As figuras 26 e 27 demonstram o processo de execução.

Figura 26 - Representação da estrutura das vigas



Fonte: CyBe Construction, 2023

Figura 27 - Esquema da estrutura das paredes



Fonte: CyBe Construction, 2023

Fase 3 – Operacional

Etapa em que é colocada em prática todas as informações e dados alinhados nas etapas anteriores. Nesse momento todas as diretrizes de projeto são alinhadas e é feita a documentação, que deve incluir os projetos, os romaneios das peças a serem impressas e as coordenadas de posicionamento da máquina para que ela trabalhe na impressão das paredes. Após a documentação, a impressão da construção é autorizada.

Fase 4 – Acabamento

Nessa etapa são feitas as instalações elétricas e hidrossanitárias e o acabamento das paredes impressas. A CyBe conta que as aberturas para instalações não foram pensadas na fase conceitual, mas que, a partir desse projeto, elas passaram a fazer parte desde o início da concepção. De acordo com a empresa, os conduítes e tubulações foram posicionados depois da conclusão da impressão fazendo cortes nas paredes, gerando um gasto extra de tempo e esforço. No entanto, o resultado não foi impactado com essa mudança. As figuras 28 e 29 mostram o resultado externo e interno, respectivamente, da impressão da Robust Villa.

Figura 28 - Resultado externo da impressão da Robust Villa



Fonte: CyBe Construction, 2023

Figura 29 - Resultado interno da Robust Villa



Fonte: CyBe Construction, 2023

É importante ressaltar que, mudando de máquina e/ou empresa, algumas etapas podem deixar de existir e outras podem ser acrescentadas. A impressora utilizada para esta construção era mais portátil e fácil de mover dentro da casa, no entanto, tratando-se de uma impressora em formato de pórtico, por exemplo, uma etapa crucial seria a posição, que deveria garantir que as coordenadas enviadas à máquina durante a impressão fossem condizentes com as possibilidades de movimentação do bico extrusor nos eixos. Conforme supracitado no início deste tópico, ao tratar de impressão 3D, cada caso é único e deve ser cuidadosamente estudado pelo corpo executivo que estará à frente do projeto.

6 CONSTRUÇÕES FEITAS POR IMPRESSÃO 3D DE MISTURAS CIMENTÍCIAS

6.1 UJ House

Em 2022, um projeto dos departamentos de arquitetura e design e de ciência e inovação da Universidade de Joanesburgo foi responsável por imprimir a primeira construção em 3D da África do Sul com o objetivo de solucionar a crise da falta de moradia no país, que atualmente enfrenta um atraso habitacional de mais de 2,5 milhões de habitações de acordo com dados da própria CyBe Construction. A estrutura da casa de 45m² foi impressa in loco pela CyBe RC, em um período de 8h, o que fez com que o Fundo Sul-Africano de Habitação e Infraestruturas (SAHIF) se interessasse em uma parceria direta com a fabricante. Essa parceria ajudaria o país a alcançar o objetivo da Organização das Nações Unidas (ONU) de fornecer habitação segura e acessível para todos até 2030. A figura 30, a seguir, mostra a UJ House com as estruturas das paredes impressas.

Figura 30 - UJ House: Primeira casa construída por impressão 3D da África do Sul



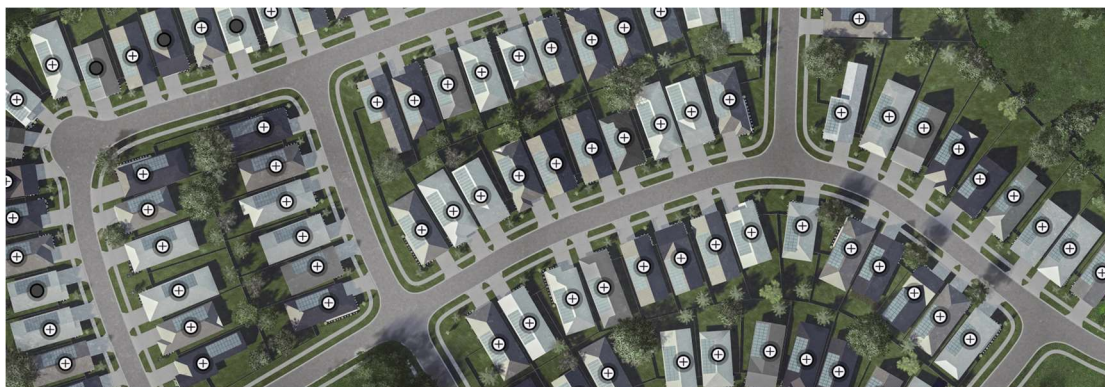
Fonte: CyBe Construction, 2023

Outro ponto que serviu de incentivo para que o SAHIF assinasse o acordo foi a ocorrência de terremotos na região, já que havia a necessidade de construção de casas com preços acessíveis, mas que fossem resistentes, como afirmou, o CEO da SAHIF, Rali Mampeule. A UJ House, casa precursora do projeto entre o SAHIF e a CyBe, não foi apenas mais uma construção em 3D. De acordo com a CyBe (2023), a impressão de casas na África do Sul inclui um olhar diferente para o formato da arquitetura e o material utilizado, onde o ponto chave seria o uso do CyBe Mortar.

6.2 The Genesis Collection

Construído pela ICON em parceria com as empresas BIG e Lennar, o Genesis Collection é um condomínio de 100 casas impressas em 3D em Georgetown, Texas, EUA (figura 31).

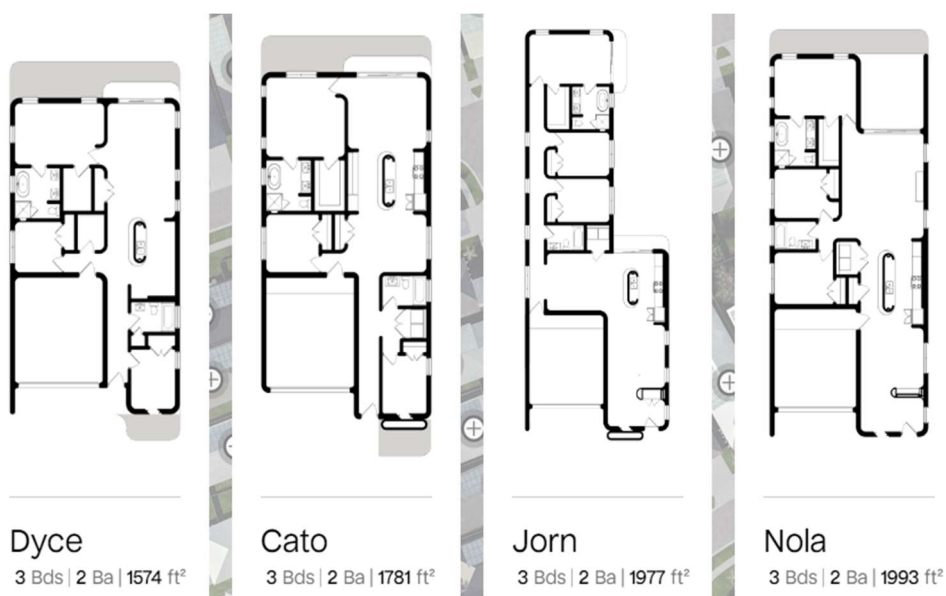
Figura 31 - Genesis Collection



Fonte: ICON, 2023

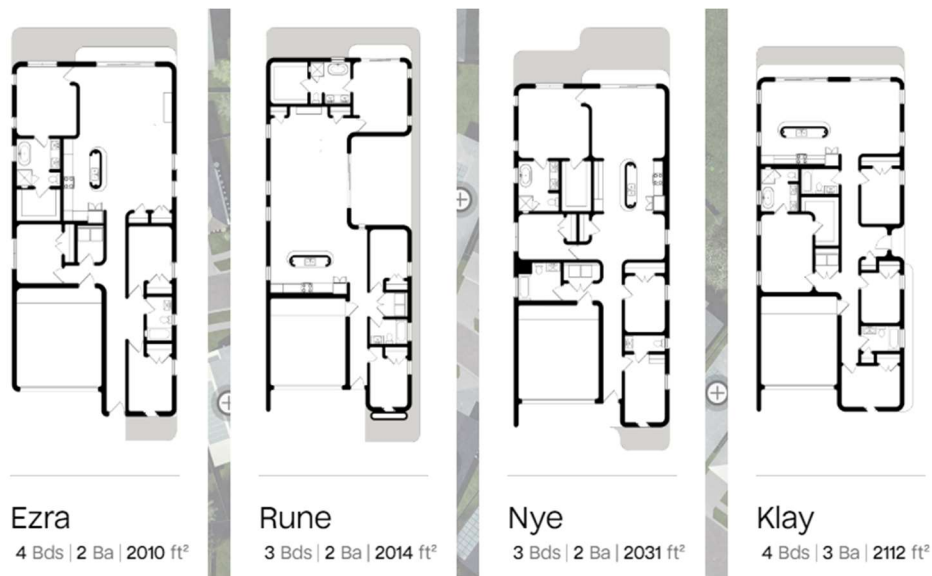
O condomínio possui oito modelos de casas diferentes, com áreas que variam entre 146m² e 196m² e com preços de venda que variam entre 475 e 590 mil dólares (o equivalente a 2,5 e 3 milhões, com a cotação do dólar a R\$5,05 em 15 de outubro de 2023). As casas disponíveis estão representadas nas figuras 32 e 33, a seguir.

Figura 32 - Genesis Collection: Modelos



Fonte: ICON, 2023

Figura 33 - Genesis Collection: Modelos



Fonte: ICON, 2023

De acordo com a ICON, todas as casas foram pensadas para serem o mais sustentáveis possíveis, desde a construção robótica até o consumo de energia, já que elas são equipadas com painéis solares fotovoltaicos. Os telhados foram pensados para serem mais duráveis e serem resistentes ao fogo assim como as paredes, que também devem resistir à umidade e agentes patológicos como mofo e cupins. A ICON cita também que, nos testes estruturais, as paredes excederam os requisitos de resistência em mais de 350%.

A figura 34 se trata da casa Ezra, modelo intermediário com cerca de 187m² e contendo 4 quartos e 2 banheiros.

Figura 34 - Fachada da casa Ezra



Fonte: ICON, 2023

6.3 The BOD

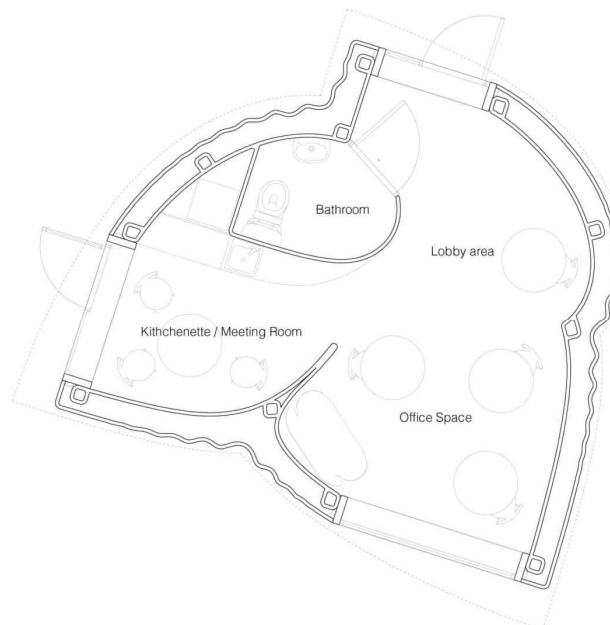
The BOD (figura 35) é como um escritório de pouco menos de 50m² impresso no período de 2 meses, em 2017, na Dinamarca, pela COBOD. A construção, que foi a primeira a ser impressa em 3D na Europa, não possui nenhuma parede reta (Figura 36) e, de acordo com os responsáveis pelo projeto, foi algo proposital e que serviu como uma forma de mostrar para o mundo as possibilidades arquitetônicas quando se utiliza uma impressora 3D de concreto.

Figura 35 - The BOD



Fonte: COBOD, 2017

Figura 36 - Planta Baixa da The BOD



Fonte: COBOD, 2017

No entanto, em 2019, depois de dois anos da construção da The BOD, a COBOD decidiu imprimir novamente a arquitetura utilizando uma versão mais atual da impressora, que concluiu o trabalho em 28 horas distribuídas ao longo de 3 dias. De acordo com a empresa, esse resultado demonstra um ganho de 20x mais produtividade, alcançando um ritmo de impressão de cerca de 1,57m³/dia por pessoa (considerando equipe de 2 pessoas).

A COBOD afirma que, nessa segunda tentativa, a construção que possui um pé direito de aproximadamente 3,8m, foi impressa em duas partes. Na primeira parte, ao longo de 18 horas, a impressora foi capaz de imprimir camadas que somaram cerca de 1,65m de altura e na segunda parte, trabalhando por 11 horas e com um bico diferente e mais potente, a máquina imprimiu as camadas restantes, que somavam 2,13m. A figura 37 resume os resultados obtidos pela COBOD na reimpressão da construção.

Tabela 2 - Resultados alcançados em 2019 com a reimpressão da The BOD

Processo: Tempo e altura	Processo: Números chave	Material
Dia 1+2 (sem vibração): - 9,4 cm/hora - 165 cm em 18 horas	Tempo total: - 28,5 horas	Material impresso: - 20,7 toneladas (16% água)
Dia 3 (com vibração): - 19,4 cm/hora - 213 cm em 11 horas	Tempo de impressão efetiva: - Aproximadamente 17,5 horas	Material impresso por hora: - 0,73 toneladas \approx 0,33m ³
	Redução percentual do tempo de impressão: - 41%	Impressão por trabalhador por dia (equipe de 2 pessoas): - 3,45 toneladas \approx 1,57m ³
	Velocidade máxima de impressão: - 350 mm/s	
	Velocidade média de impressão: - Aproximadamente 150 mm/s	

Fonte: Adaptado de COBOD, 2019

6.4 10 casas em 24H – WINSUN

Por volta de 2013, na China, a WINSUN construiu 10 casas em apenas 24h. Utilizando uma impressora com um pouco mais de 6m de altura, a empresa chinesa usou materiais reciclados para imprimir os componentes das casas que seriam as primeiras construções feitas em impressão 3D de concreto do mundo. As peças foram feitas de forma isolada e, posteriormente, montadas no local, com o custo de cada imóvel girando em torno de US\$4.800 (cerca de R\$24,24 mil com o dólar a R\$5,05 em 15 de outubro de 2023). A figura 38 mostra a casa construída, incluindo sistema de cobertura e esquadrias.

Figura 37 - Casa construída pela WinSun



Fonte: Walker, 2014

A casa foi feita com uma mistura de concreto reforçado com fibra de vidro com as impressoras 3D de concreto convencionais, que fazem a extrusão dos materiais camada por camada. As construções também podem incluir isolamento, instalações elétricas e hidrossanitárias, além das esquadrias. No entanto, os planos da empresa consistem em construir fábricas de reciclagem na China para realizar a coleta de resíduos para que estes sejam trabalhados como materiais, em potencial, para a impressão 3D.

6.5 Habita-se Maceió – AL

Esse caso trata-se de um projeto em andamento da InovaHouse3d que iniciou em 2022. A ideia é fazer um complexo habitacional de interesse social que vai beneficiar 20 famílias. A empresa, inclusive, já apresentou a proposta de arquitetura e o projeto foi aprovado, podendo seguir para as demais esferas no processo de construção. A figura 39 mostra uma maquete em 3D da casa do projeto Habita-se Maceió.

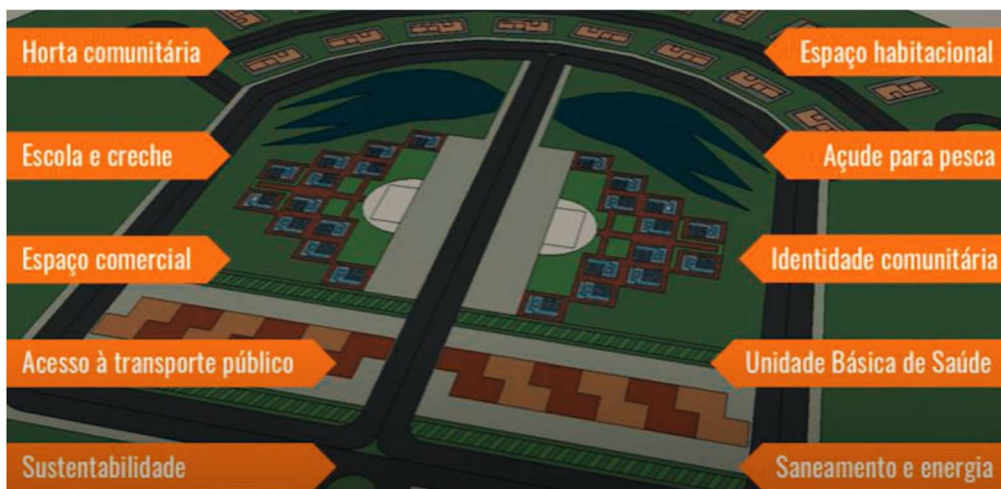
Figura 38 - Modelo 3D da casa do projeto Habita-se Maceió



Fonte: InovaHouse3D, 2022

Esse projeto que é uma parceria entre a empresa, a Cruz Vermelha e a prefeitura de Maceió, contará com área de lazer, espaços comerciais, hortas comunitárias, espaços para pesca e outros (Figura 40). De acordo com a empresa, a execução depende da regularização do terreno e aprovação do projeto de loteamento, por isso, ainda não pôde ser iniciada.

Figura 39 - Planta baixa do complexo habitacional e espaços integrantes



Fonte: InovaHouse3d, 2022

7 COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA COM TÉCNICAS CONVENCIONAIS – PAREDES DE CONCRETO

Este tópico se desenvolverá na comparação de custos e tempo de execução de uma construção feita por impressora 3D, utilizando um método análogo, e mais conhecido, que é o de paredes de concreto.

A construção-base utilizada como matéria de comparação foi a casa feita na Rússia, em 2017, pela Apis Cor. De acordo com a empresa, essa casa possui 38m², foi construída em 24h e custou \$10.134, preço que inclui os gastos com fundação, cobertura, acabamento interno e externo, isolamento, janelas, pisos, forro, além dos gastos com a impressão da estrutura da casa. Segundo a Apis Cor, o custo dessa obra foi 70% menor se comparado às construções convencionais.

A figura 41, a seguir, mostra a construção-base escolhida para fazer o estudo comparativo.

Figura 40 - Casa impressa pela Apis Cor



Fonte: Apis Cor, 2016

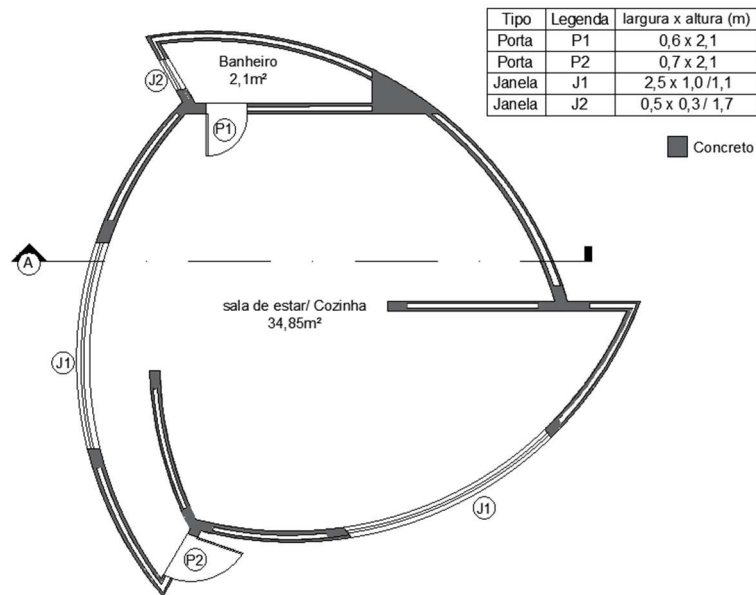
A escolha desta construção se deve ao fato de que a empresa divulgou o custo de produção da casa (ao contrário de outras empresas que divulgaram apenas o preço de venda) e por conta dos itens que estão incluídos nesse custo, que abrangem, de fato, todas as etapas de uma construção ao invés de se referir apenas à impressão das paredes (como no caso da casa impressa no Brasil)

7.1 Definição do layout de comparação

Não foi possível encontrar na internet uma planta baixa da construção, por isso, foi feita uma “planta modelo” para estimar alguns dados. O perímetro da planta modelo foi de 26,1m, a área (em planta) das paredes foi de 4,8m² e a área interna foi de 38,5m², representando um grau de precisão de 98,7% em relação à área da construção original.

Outro destaque é para o layout da construção. A Apis Cor cita que a casa impressa não possui muitas divisórias além daquelas utilizadas no banheiro, corredor e sala/cozinha, além disso, as paredes são ocas. Portanto, a planta modelo, apresentada na figura 41, também foi pensada dessa forma.

Figura 41 - Planta baixa modelo da casa impressa pela Apis Cor

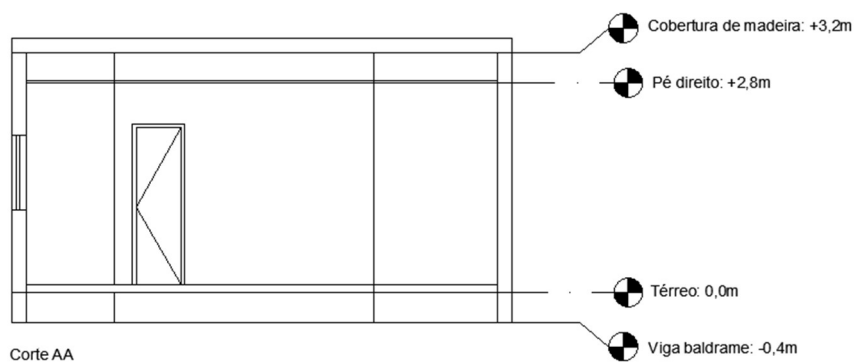


Fonte: Adaptado de Apis Cor, 2016

A empresa não citou o pé direito da construção, por isso foram feitas estimativas de altura do forro, pé direito e cobertura para seguir a comparação. Outra altura estimada foi da fundação cuja única informação exposta pela Apis Cor foi que se trata de um sistema de vigas baldrame.

A figura 43 mostra o esquema de alturas adotadas neste estudo.

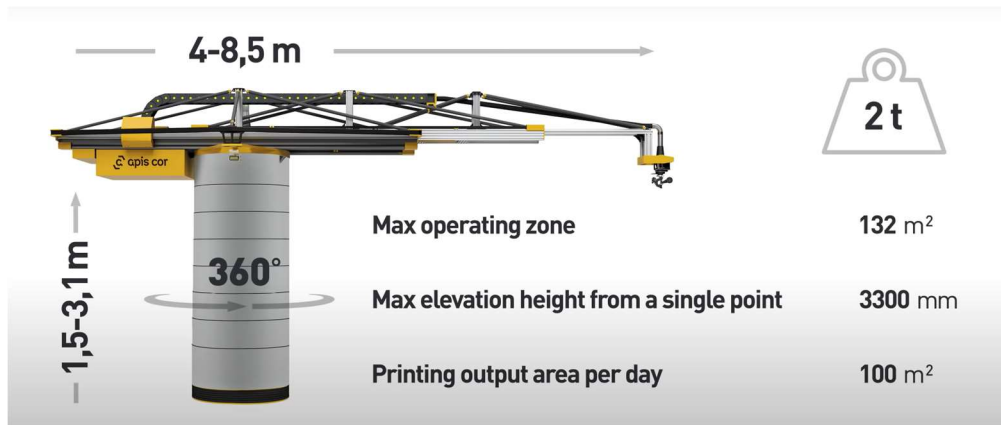
Figura 42 - Esquema de alturas da casa impressa pela Apis Cor



Fonte: Autor, 2023

As dimensões foram estimadas com base nas propriedades da impressora utilizada pela Apis Cor para imprimir a casa (figura 44).

Figura 43 - Propriedades da impressora utilizada para construir a casa da Apis Cor



Fonte: Apis Cor, 2016

7.2 Casa de paredes de concreto

7.2.1 Memória de cálculo

- a) Fundação (seção da viga baldrame: 0,2m x 0,4m)
 - Escavação (considerando +0,1m na largura para a colocação de fôrmas):
 $0,3\text{m} \times 0,4\text{m} \times 26,1\text{m} = 3,132\text{m}^3$
 - Formas: $0,4\text{m} \times 26,1\text{m} \times 2 \text{ lados} = 20,88\text{m}^2$
 - Concreto: $0,2\text{m} \times 0,4\text{m} \times 26,1\text{m} = 2,088\text{m}^3$
 - Impermeabilização (apenas na face superior da viga): $0,2\text{m} \times 26,1\text{m} = 5,22\text{m}^2$

- b) Paredes (nesse caso, considera-se a área de parede que inclui o perímetro da construção e as paredes de divisória)
 - Formas: $3,2\text{m} \times 40,5\text{m} \times 2 \text{ lados} = 259,2\text{m}^2$
 - Concreto: $3,2\text{m} \times 4,8\text{m}^2 = 15,36\text{m}^3$

- c) Coberturas
 - Forro: $2,1\text{m}^2 + 34,85\text{m}^2 = 36,95\text{m}^2$
 - Teto (em madeira, conforme construção original): $2,1\text{m}^2 + 34,9\text{m}^2 + 4,8\text{m}^2 = 41,8\text{m}^2$

d) Esquadrias:

- Porta de madeira (0,6m x 2,1m): 1 unidade
- Porta de madeira (0,7m x 2,1m): 1 unidades
- Janela de alumínio + vidro (2,5m x 1m): 2 unidades
- Janela basculante de alumínio + vidro (0,5m x 0,3m): 1 unidade

e) Pisos e revestimentos:

- Contrapiso (espessura de 0,15m): $0,15m \times (2,1m^2 + 34,85m^2) = 5,54m^3$
- Revestimento: $2,1m^2 + 34,85m^2 = 36,95m^2$

f) Pintura e acabamento (considerando o dobro do perímetro acréscimo das divisórias internas):

- Selador acrílico (1 demão): $3,2m \times 40,5m \times 2 \text{ lados} = 259,2m^2$
- Pintura (2 demãos): $3,2m \times 40,5m \times 2 \text{ lados} = 259,2m^2$

g) Ponderações:

- Consumo de aço: De acordo com a NBR 6118, caso a massa específica do concreto utilizado não seja conhecida, pode-se adotar para o concreto simples o valor de 2400 kg/m^3 e para o concreto armado 2500 kg/m^3 . Para o cálculo, a diferença de 100kg/m^3 entre uma massa específica e outra será considerada como o consumo de aço por m^3 de concreto. Dessa forma:

$$100\text{kg/m}^3 \times (2,088\text{m}^3 + 15,36\text{m}^3 + 5,54\text{m}^3) = 2298,8 \text{ kg}$$

10% desse total (229,88kg) será precificado como armadura de reforço.

- Instalações elétricas e hidrossanitárias: averbado na etapa de precificação, adotando-se percentuais de 8% e 12%, respectivamente.

7.2.2 Precificação

Os custos foram calculados com base nas composições da tabela SINAPI de agosto de 2023 (08/2023) modelo não desonerado e que inclui os encargos trabalhista como alimentação, transporte, seguro e outros. O total foi de R\$110.909,79 onde o m^2 custa R\$2.918,68. O total de cada etapa encontra-se na tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Resumo da precificação de cada etapa

Item	Etapa	Total (R\$)
1	FUNDAÇÃO	4895,74
2	PAREDES	37.630,93
3	COBERTURAS	6.383,21
4	ESQUADRIAS	4109,41
5	PISOS E REVESTIMENTOS	11.421,82
6	PINTURA E ACABAMENTO	3885,41
7	PONDERAÇÕES	42.583,29
Total geral (R\$)		110.909,81

Fonte: Autor, 2023

A planilha sintética consta no anexo A.

7.2.3 Tempo de execução

Para calcular o tempo de execução do serviço, foi utilizada a planilha analítica das composições levantadas no item 7.2.1. Foi feita uma análise com base nos coeficientes de mão de obra determinados pelo SINAPI para a execução de cada serviço e, em composições com mais de um tipo de mão de obra, optou-se por utilizar o maior coeficiente.

O total foi de 461,75h (tabela 4), com o ritmo de produção de 0,08m²/h. Se for considerada a jornada de 8h/dia e 5 dias/semana, a finalização da construção da casa utilizando o método de paredes de concreto se dará após cerca de 11,5 semanas.

Tabela 4 - Resumo do tempo de execução de cada etapa

Item	Etapa	Total (h)
1	FUNDAÇÃO	43,79
2	PAREDES	165,09
3	COBERTURAS	39,96
4	ESQUADRIAS	2,76
5	PISOS E REVESTIMENTOS	8,60
6	PINTURA E ACABAMENTO	59,54
7	PONDERAÇÕES	142,01
Total geral (h)		461,75

Fonte: Autor, 2023

A planilha sintética que demonstra o tempo de execução unitário de cada serviço consta no anexo B.

7.3 Casa impressa em 3D - Custo de impressão e tempo de execução

Conforme supracitado, a casa impressa em 2017 custou \$10.134,00. Com o dólar cotado a R\$5,05 (em 15 de outubro de 2023), a casa custaria R\$51.176,70, cerca de R\$1.346,75/m². O tempo de execução foi de 24h, com um ritmo de produção de cerca de 1,58m²/h. Se for considerada a jornada de 8h/dia, a finalização da construção da casa utilizando o método de impressão 3D de concreto se dará após cerca de 3 dias.

7.4 Resultados

A tabela 5 reúne os dados que podem ser extraídos deste estudo comparativo.

Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos

Parâmetro	Paredes de Concreto	Impressão 3D	Resultado
Custo de produção (R\$)	110.909,79	51.176,70	-53,86%
Tempo de execução (h)	461,75	24	-94,80%
Produtividade (m ² /h)	0,08	1,58	+ 20x

Fonte: Autor, 2023

Os resultados expostos na tabela 5 demonstram o quanto a metodologia construtiva de impressão 3D pode ser vantajosa. Observando o custo de produção dos dois métodos, nota-se uma redução de 53,86% no valor total ao optar por imprimir uma casa de concreto. Sabe-se que as construções de paredes de concreto são populares devido à velocidade de produção, no entanto, nota-se que o tempo de execução reduziu em aproximadamente 95% com o método de impressão 3D, alcançando uma produtividade 20x maior do que a metodologia de paredes de concreto.

Outro ponto positivo é que em uma obra convencional é comum se deparar com uma equipe multidisciplinar composta por vários engenheiros, pedreiros, bombeiros hidráulicos e eletricitas. Com uma casa feita por impressão 3D, a quantidade de pessoas dessa equipe diminui bastante, no entanto, como consequência, as exigências por uma mão de obra qualificada são maiores.

Ressalta-se que este estudo comparativo possui algumas falhas que possivelmente interferem nos resultados. São eles:

- Localização: A casa original não foi construída no Brasil. Este fato possui alguma influência no custo dos materiais utilizados na construção e, portanto, no preço final divulgado pela Apis Cor;
- Plantas: apesar da precisão de 98,7%, a planta modelo utilizada não reproduz a casa original. Dados como as alturas, tamanhos e quantidade de esquadrias e o próprio layout da arquitetura influenciam nos resultados, principalmente no consumo de concreto;
- Precificação: foi feito um orçamento estimado, por isso, dados referentes às instalações elétricas e hidrossanitárias e de consumo de aço possivelmente apresentam alguma discrepância em relação à construção real. Além disso, não foram considerados alguns itens como os serviços de topografia e terraplenagem, por exemplo;
- Tempo de execução: assim como a precificação, o tempo de execução também foi estimado. Esse cálculo foi feito com base em dados do SINAPI que não reproduzem fielmente a velocidade de mão de obra.

Ainda assim, a construção feita por impressora 3D obteve um custo equivalente a um pouco menos da metade do custo da construção feita por paredes de concreto. Por isso, possivelmente, com um orçamento detalhado e exato, a impressão continuaria sendo bastante competitiva, devido ao tempo de produção.

Outro ponto é o custo do equipamento. Estima-se que o preço de uma impressora 3D de concreto pode variar:

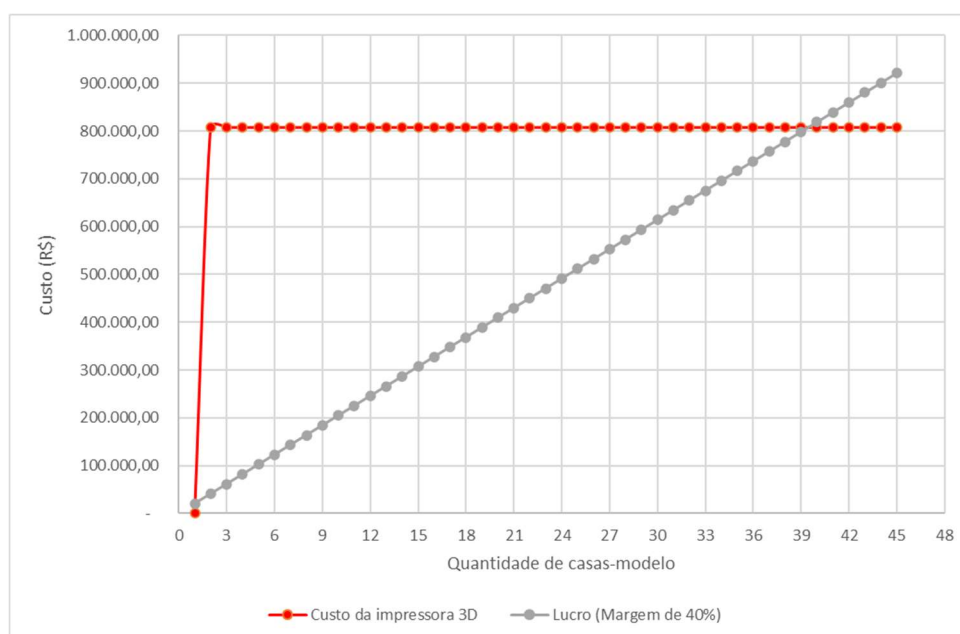
- Entre US\$20 e US\$50 mil - modelos de pequeno porte;
- Entre US\$50 e US\$200 mil - modelos de médio porte;
- Entre US\$200 mil a milhões de dólares - Modelos de porte industrial.

A Frank, modelo da Apis Cor, se encaixa como uma impressora de porte médio, capaz de imprimir construções um pouco mais robustas ao invés de imprimir apenas pequenas peças isoladas. Como não foram encontrados os preços de venda desta impressora ou similares, será adotado o percentual de 80% do valor máximo da sua faixa de preço (US\$200 mil), o equivalente a US\$160 mil, cerca de R\$808 mil (com o dólar a R\$5,05).

Dessa forma, é possível estimar em que momento a impressora “se pagaria”, após imprimir várias casas-modelo, como esta da Apis Cor, que é o objeto de estudo. Para esta estimativa são analisados três fatores: o custo da máquina, o custo de produção e o preço de venda, considerando uma margem de lucro de 40%. Assim, uma casa que custou R\$ 51.176,70 para ser impressa, pode ser vendida por R\$ 71.647,38, obtendo-se um lucro real de R\$ 20.470,68 por unidade.

O gráfico 1, abaixo, ilustra a relação entre a quantidade de casas-modelo que precisariam ser impressas para alcançar o preço de compra da impressora.

Gráfico 1 - Quantidade de casas impressas x Custo



Fonte: Autor, 2023

Nota-se que após imprimir em torno de 40 casas-modelo, as retas se cruzam, indicando que os dois parâmetros (custo da máquina e lucro real) teriam se equiparado. No entanto, é importante frisar que, considerando o tempo de impressão de cada casa e o tempo de mobilização e desmobilização da máquina entre uma produção e outra, o retorno financeiro dessas construções já seria visível em cerca de 2 meses.

8 CONCLUSÃO

A análise comparativa apresentada neste estudo demonstra de forma clara os diversos benefícios da tecnologia de impressão 3D na construção civil. Os resultados indicam uma redução significativa nos custos de produção e no tempo de execução em comparação com a metodologia tradicional de construção de paredes de concreto. Um dos principais pontos de destaque é a redução de 53,86% no custo de produção ao optar pela impressão 3D. Isso não apenas torna a tecnologia de impressão 3D mais econômica, mas também abre portas para a construção de moradias acessíveis e sustentáveis e que podem ser trabalhadas por órgãos públicos nos programas de habitação de interesse social.

Além disso, a redução de aproximadamente 95% no tempo de execução com a impressão 3D demonstra o aumento da eficiência na construção e abre possibilidades para a resposta frente às necessidades urgentes de moradia, como nos casos de desastres naturais. A produtividade significativamente maior da impressão 3D, 20 vezes maior do que as paredes de concreto, destaca o potencial de transformação dessa tecnologia na indústria da construção. Essa produtividade elevada pode resultar em uma maior produção de habitações em menos tempo, atendendo a demandas crescentes por moradias em muitas partes do mundo.

No entanto, é importante reconhecer que este estudo comparativo apresenta algumas limitações e, para uma avaliação mais precisa, é fundamental considerar esses fatores. Também se destaca o custo da impressora 3D em si, que varia de acordo com o porte da máquina. No entanto, a análise aponta que, com a produção de cerca de 40 casas-modelo, o investimento na impressora se tornaria economicamente viável, reforçando o grande potencial de retorno financeiro.

A tecnologia de impressão 3D na construção de casas de concreto apresenta um grande potencial para revolucionar a indústria da construção, tornando-a mais eficiente, econômica e sustentável. Os resultados deste estudo indicam que a impressão 3D pode desempenhar um papel fundamental na resolução de desafios habitacionais em todo o mundo, oferecendo uma alternativa inovadora às metodologias tradicionais de construção. Por isso, é importante continuar a pesquisa e o desenvolvimento nessa área para superar as limitações e desafios existentes e aproveitar o potencial dessa tecnologia.

Sugere-se, para estudos posteriores, que sejam feitas análises mais aplicadas, como no caso de uma produção em duas metodologias diferentes, porém, no mesmo local (ao mínimo, no mesmo país). Também é ideal que sejam considerados fatores como o custo da mistura de impressão, já que se trata de um material não-convencional.

Além disso, propõe-se estudos mais aprofundados na produção de uma impressora nacional, o que poderia significar uma aceleração nacional na corrida da construção por impressão 3D, além de trazer mais facilidade e precisão nos processos de precificação de uma construção impressa em 3D no Brasil.

REFERÊNCIAS

3D CONCRETE PRINTING. CyBe Construction. Disponível em <<https://cybe.eu/>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C33: Standard specification for concrete aggregates.** West Conshohocken, EUA. 8p. 2019. Disponível em <<https://www.studocu.com/en-us/document/ohio-state-university/civil-engineering-materials/astm-c33/17625713>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

ARAÚJO, T. G. **Indústria 4.0: O que esperar da 4ª revolução industrial.** SENAI. Disponível em <<https://www.senai-ce.org.br/blog/industria-4-0-o-que-esperar-da-4a-revolucao-industrial/>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7122: Agregados para o concreto - Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 14p. 2022. Disponível em <<https://pt.scribd.com/document/655410464/NBR-7211-2022>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000: Sistemas de gestão da qualidade — Fundamentos e vocabulário.** Rio de Janeiro, RJ, 65p. 2015. Disponível em <https://tecnologia.qualidade.faccat.br/moodle/pluginfile.php/1386/mod_folder/content/0/NORMA%20ISO%2090002015.pdf?forcedownload=1>. Acesso em 17 de setembro de 2023.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado.** Bauru, SP, 96p. 2023. Disponível em <<https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>>. Acesso em 18 de setembro de 2023.

CARBONARI, L. T. et al. **Aplicação da tecnologia de impressão 3D com materiais cimentícios em projetos residenciais.** Florianópolis, SC, 9p. 2023. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/247106/VOLUME%202%20104%20-%20112.pdf?sequence=1>>. Acesso em 19 de setembro de 2023.

CARDOSO, E. et al. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para uso da impressão 3D na construção de casas populares no Brasil.** São Paulo, SP, 13p. 2022. Disponível em <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/26189/2/Estudo%20da%20viabilidade%20te%CC%81cnica%20e%20econo%CC%82mica%2>>

0para%20uso%20da%20impressa%CC%83o%203D_EC_CEN%20.pdf>. Acesso em 27 de maio de 2023.

Catedral de Salisbury. Arte fora do museu. Disponível em <<https://arteforadomuseu.com.br/catedral-de-salisbury/>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

COMPANHIA chinesa constrói o primeiro prédio do mundo feito a partir de uma impressora 3D. O Globo, 21 de janeiro de 2015. Disponível em <<https://oglobo.globo.com/economia/companhia-chinesa-constroi-primeiro-predio-do-mundo-feito-partir-de-uma-impressora-3d-15107866>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

CRANE WASP. WASP. Disponível em <<https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

CUNHA, R. 3DHomeConstruction constrói a primeira casa de impressão 3D no Brasil. Stylo Urbano, 09 de julho de 2020. Disponível em <<https://www.stylourbano.com.br/3dhomeconstruction-constroi-a-primeira-casa-de-impressao-3d-do-brasil/>>. Acesso em 05 de outubro de 2023.

CURTH, A. 3-D Printed concrete. Structure Magazine, julho de 2022. Disponível em <<https://www.structuremag.org/?p=20944>>. Acesso em 19 de setembro de 2023.

EMPRESA japonesa fabrica casa em impressão 3D em menos de 24 horas. Gazeta do Povo, 01 de abril de 2022. Disponível em <<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/empresa-japonesa-fabrica-casa-em-impressao-3d-em-menos-de-24-horas/>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

FILGUEIRA, M. B. et al. Elementos de concretos produzidos por impressão 3D com foco na aderência entre camadas: uma revisão. Florianópolis, SC, 13p. 2021. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/228823/583595.pdf?sequence=1>>. Acesso em 18 de setembro de 2023.

FILHO, A. J. S. Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação metrológica do processo de modelagem por fusão e deposição (fdm) através de um planejamento fatorial fracionário. Brasília, DF. 143p. 2020. Disponível em <http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/40998/1/2020_Ad%C3%A3oJos%C3%A9Sp%C3%ADndolaFilho.pdf>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

FORMIGA, C. V. F. e CARNEIRO, M. L. **Impressão 3D em Concreto: Revisão da Literatura e Desafios**. Foz do Iguaçu, PR, 15p. 2020. Disponível em < https://abepro.org.br/biblioteca/TN_WPG_346_1779_41448.pdf> Acesso em 19 de setembro de 2023.

HELENE, P. R. L e LEVY, S. M. **“Estado da arte” do concreto como material de construção**. São Paulo, 8p. 2003. Disponível em <<https://periodicos.uninove.br/exacta/article/download/523/501>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

How our experienced architects can help you slash the costs and construction time of your projects. CyBe construction. Disponível em <<https://cybe.eu/webinars/past-cybe-projects/>>. Acesso em 06 de outubro de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. Observatório da Produtividade Regis Bonelli – Sobre. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em <<https://ibre.fgv.br/observatorio-produtividade/sobre>>. Acesso em 17 de setembro de 2023.

KHAN, M. A. et al. **Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – A review**. Hyderabad, India, 25p. 2023. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132962>>. Acesso em 19 de setembro de 2023.

MEET FRANK AND HIS FAMILY. Apis Cor. Disponível em <<https://apis-cor.com/technologies/>>. Acesso em 05 de outubro de 2023.

MEET VULCAN OUR HOME-SIZED 3D-PRINTER. ICON. Disponível em <<https://www.iconbuild.com/technology>>. Acesso em 05 de outubro de 2023.

MENDES, M. **Primeira revolução industrial**. Educa mais Brasil, 12 de fevereiro de 2021. Disponível em < <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/historia/primeira-revolucao-industrial>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

MORAES, F. M. S. **Fatores que influenciam a produtividade da mão de obra na construção civil: uma revisão de literatura**. Barra do Garças, MT, 68p. 2019. Disponível em <<http://bdm.ufmt.br/handle/1/1055>>. Acesso em 18 de setembro de 2023.

O segredo de como os monumentos de Roma permanecem em pé. BBC News Brasil, 6 de fevereiro de 2022. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/vert-tra-59808565>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

PAIM, F. G. e ALMEIDA, M. R. S. **Estudo prospectivo sobre a utilização da impressora 3d na área da construção civil.** Salvador, BA, 12p. 2017. Disponível em <<https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/23379/ESTUDO%20PROSPECTIVO%20SOBRE%20A%20UTILIZA%C3%87%C3%83O%20DA%20IMPRESSORA%203D%20NA%20C%81RE>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

PASSOS, L. H. S. **A indústria 4.0: fundamentos e principais impactos na economia brasileira.** Porto Velho, RO. 11p. 2020. Disponível em <<https://periodicos.unir.br/index.php/rara/article/download/4946/3606/20358>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

PERROT, A. **3D Printing of concrete – State of the art and challenges of the digital construction revolution.** Ed. Wiley, 181p. 2019.

PORTO, T. M. S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3d e da sua aplicação na construção civil.** Rio de Janeiro, RJ, 93p. 2016. Disponível em <<https://www.arataumodular.com/app/wp-content/uploads/2022/07/Estudo-dos-Avanços-da-Tecnologia-de-Impressao-3d-e-da-Sua-Aplicacao-na-Construcao-Civil.pdf>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

SANTORO, J. F. **Subsídios para a minimização do impacto ambiental de estruturas de concreto armado.** Passo Fundo, RS, 167p. 2021. Disponível em <<http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/2311#preview-link0>>. Acesso em 28 de agosto de 2023.

SANTOS, A. **Projeto no RN constrói 1ª casa do Brasil com impressora 3D.** Cimento Itambé, 2020. Disponível em <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/projeto-no-rn-constroi-1a-casa-do-brasil-com-impressora-3d/>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

SERAGUSA, F. **EUA constrói 1ª casa de dois andares com impressora 3D.** Cimento Itambé, 2023. Disponível em <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/eua-constroi-1a-casa-de-dois-andares-com-impressora-3d-veja-video/>>. Acesso em 28 de maio de 2023.

SILVA, L. S. **Uso da impressão 3D na construção de pequenas moradias no Brasil – Uma oportunidade ou uma utopia?.** Porto, Portugal. 110p. 2022. Disponível em

<<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/140324/2/539420.pdf>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

SILVA, R. B.; PAIVA, T. P. D. A. **A Aplicação do Método da Lean Construction na Construção Civil**. Publicação nº 24, Curso de Engenharia Civil, Evangélica, Goianésia, GO, 41p. 2017. Disponível em <<http://45.4.96.19/bitstream/ae/497/1/20172RAISSATHAYNNAN.pdf>>. Acesso em 27 de maio de 2023.

SOUSA, R. **Segunda Revolução Industrial**. Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/historiag/segunda-revolucao-industrial.htm>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

SOUSA, R. **Terceira Revolução Industrial**. Mundo Educação. Disponível em <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/terceira-revolucao-industrial.htm>>. Acesso em 03 de outubro de 2023.

STIVALI, M. e MATTEI, T. F. **Considerações distributivas em análise custo-benefício**. Brasília, DF, IPEA 38p. 2023. Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11754/1/TD_2850_Web.pdf>. Acesso em 18 de setembro de 2023.

THE BOD BUILDING. COBOD. Disponível em <<https://cobod.com/projects-partners/the-bod-building/>>. Acesso em 08 de outubro de 2023.

THE BOD2. COBOD. Disponível em <<https://cobod.com/solution/bod2/>>. Acesso em 05 de outubro de 2023.

The Genesis Collection at Wolf Ranch. ICON. Disponível em <<https://homes.iconbuild.com/wolf-ranch/>>. Acesso em 07 de outubro de 2023.

UJ HOUSE. CyBe Construction. Disponível em <<https://cybe.eu/cases/uj-house/>>. Acesso em 07 de outubro de 2023.

WALKER, C. **Empresa chinesa produz 10 casas em 24 horas através de impressão 3D**. ArchDaily, 24 de abril de 2014. Disponível em <<https://www.archdaily.com.br/br/601266/empresa-chinesa-produz-10-casas-em-24-horas-atraves-de-impressao-3d>>. Acesso em 19 de setembro de 2023.

ANEXO A

ITEM	CÓDIGO	ETAPA	UND	CUSTO UNITÁRIO	QNTD.	TOTAL
1 FUNDAÇÃO						
1.1	96527	ESCVAVAÇÃO MANUAL DE VALA PARA VIGA BALDRAME (INCLUINDO ESCVAVAÇÃO PARA COLOCAÇÃO DE FÔRMAS).	m ³	125,54	3,132	393,19
1.2	96533	FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA VIGA BALDRAME, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 2 UTILIZAÇÕES	m ²	94,12	20,88	1.965,23
1.3	44535 (insumo)	SERVICO DE BOMBEAMENTO DE CONCRETO (DISPONIBILIZACAO DE BOMBA), SEM O LANCAMENTO	m ³	80,71	2,088	168,52
1.4	96557	CONCRETAGEM DE BLOCOS DE COROAMENTO E VIGAS BALDRAMES, FCK 30 MPA, COM USO DE BOMBA –LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO.	m ³	1057,58	2,088	2.208,23
1.5	98555	IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE COM ARGAMASSA POLIMÉRICA / MEMBRANA ACRÍLICA, 3 DEMÃOS	m ²	30,76	5,22	160,57
2 PAREDES						
2.1	92269	FABRICAÇÃO DE FÔRMA PARA PILARES E ESTRUTURAS SIMILARES, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM	m ²	79,52	259,2	20.611,58
2.2	99432	CONCRETAGEM DE PAREDES EM EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES FEITAS COM SISTEMA DE FÔRMAS MANUSEÁVEIS, COM CONCRETO USINADO BOMBEÁVEL FCK 25 MPA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO (EXCLUSIVE BOMBA LANÇA)	m ³	1027,32	15,36	15.779,64
2.3	44535 (insumo)	SERVICO DE BOMBEAMENTO DE CONCRETO (DISPONIBILIZACAO DE BOMBA), SEM O LANCAMENTO	m ³	80,71	15,36	1.239,71

3 COBERTURAS						
3.1	96109	FORRO EM PLACAS DE GESSO, PARA AMBIENTES RESIDENCIAIS	m ²	52,03	36,95	1.922,51
3.2	CPU 1	EXECUÇÃO DE COBERTURA RESIDENCIAL EM COMPENSADO NAVAL (E=20	m ²	290,41	15,36	4.460,70
4 ESQUADRIAS						
4.1	100679	KIT DE PORTA DE MADEIRA PARA VERNIZ, SEMI-OCA (LEVE OU MÉDIA), PADRÃO POPULAR, 60X210CM, ESPESSURA DE 3,5CM, ITENS INCLUSOS: DOBRADIÇAS, MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE BATENTE, FECHADURA COM EXECUÇÃO DO FURO	und	768,09	1	768,09
4.2	100712	KIT DE PORTA DE MADEIRA PARA VERNIZ, SEMI-OCA (LEVE OU MÉDIA), PADRÃO POPULAR, 70X210CM, ESPESSURA DE 3,5CM, ITENS INCLUSOS: DOBRADIÇAS, MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE BATENTE, FECHADURA COM EXECUÇÃO DO FURO	und	759,38	1	759,38
4.3	94570	JANELA DE ALUMÍNIO DE CORRER COM 2 FOLHAS PARA VIDROS, COM VIDROS, BATENTE, ACABAMENTO COM ACETATO OU BRILHANTE E FERRAGENS	m ²	372,7	5	1.863,50
4.4	94569	JANELA DE ALUMÍNIO TIPO MAXIM-AR, COM VIDROS, BATENTE E FERRAGENS	m ²	718,44	1	718,44
5 PISOS E REVESTIMENTOS						
5.1	97096	CONCRETAGEM DE RADIER, PISO DE CONCRETO OU LAJE SOBRE SOLO, FCK 30 MPA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO	m ³	974,81	5,54	5.400,45
5.2	101727	PISO VINÍLICO SEMI-FLEXÍVEL EM PLACAS, PADRÃO LISO, ESPESSURA 3,2 MM, FIXADO COM COLA	m ²	162,96	36,95	6.021,37
6 PINTURA E ACABAMENTO						

5.1	88485	FUNDO SELADOR ACRÍLICO, APLICAÇÃO MANUAL EM PAREDE, UMA DEMÃO	m²	3,51	259,2	909,79
5.2	88489	PINTURA LÁTEX ACRÍLICA PREMIUM, APLICAÇÃO MANUAL EM PAREDES, DUAS DEMÃOS	m²	11,48	259,2	2.975,62

PONDERAÇÕES

7.1	100066	ARMAÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES DE CONCRETO, EXECUTADA COMO ARMADURA POSITIVA DE LAJES, TELA Q-196	kg	10,19	2068,92	21.082,29
7.2	91603	ARMAÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES DE CONCRETO, EXECUTADA COMO REFORÇO, VERGALHÃO DE 10,0 MM DE DIÂMETRO	kg	13,12	229,88	3.016,03
Total parcial (R\$)						92.424,82

7.3	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS		VB	8% do total parcial	7.393,99
7.4	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS		VB	12% do total parcial	11.090,98
Total geral (R\$)					110.909,79

ANEXO B

ITEM	CÓDIGO	ETAPA	UND	TEMPO UNITÁRIO	QNTD.	TOTAL
FUNDAÇÃO						
1						
1.1	96527	ESCAVAÇÃO MANUAL DE VALA PARA VIGA BALDRAME (INCLUINDO ESCAVAÇÃO PARA COLOCAÇÃO DE FÔRMAS).	m ³	4,138	3,132	12,96
1.2	96533	FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA VIGA BALDRAME, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 2 UTILIZAÇÕES	m ²	1,289	20,88	26,91
1.3	44535 (insumo)	SERVICO DE BOMBEAMENTO DE CONCRETO (DISPONIBILIZACAO DE BOMBA), SEM O LANCAMENTO	m ³	-	2,088	-
1.4	96557	CONCRETAGEM DE BLOCOS DE COROAMENTO E VIGAS BALDRAMES, FCK 30 MPA, COM USO DE BOMBA -LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO.	m ³	0,544	2,088	1,14
1.5	98555	IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE COM ARGAMASSA POLIMÉRICA / MEMBRANA ACRÍLICA, 3 DEMÃOS	m ²	0,532	5,22	2,78
2 PAREDES						
2.1	92269	FABRICAÇÃO DE FÔRMA PARA PILARES E ESTRUTURAS SIMILARES, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM	m ²	0,607	259,2	157,33
2.2	99432	CONCRETAGEM DE PAREDES EM EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES FEITAS COM SISTEMA DE FÔRMAS MANUSEÁVEIS, COM CONCRETO USINADO BOMBEÁVEL FCK 25 MPA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO (EXCLUSIVE BOMBA LANÇA)	m ³	0,505	15,36	7,76
2.3	44535 (insumo)	SERVICO DE BOMBEAMENTO DE CONCRETO (DISPONIBILIZACAO DE BOMBA), SEM O LANCAMENTO	m ³	-	15,36	-

3 COBERTURAS						
3.1	96109	FORRO EM PLACAS DE GESSO, PARA AMBIENTES RESIDENCIAIS	m ²	0,9123	36,95	33,71
3.2	CPU 1	EXECUÇÃO DE COBERTURA RESIDENCIAL EM COMPENSADO NAVAL (E=20	m ²	0,407	15,36	6,25
4 ESQUADRIAS						
4.1	100679	KIT DE PORTA DE MADEIRA PARA VERNIZ, SEMI-OCA (LEVE OU MÉDIA), PADRÃO POPULAR, 60X210CM, ESPESSURA DE 3,5CM, ITENS INCLUSOS: DOBRADIÇAS, MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE BATENTE, FECHADURA COM EXECUÇÃO DO FURO	und	0,552	1	0,55
4.2	100712	KIT DE PORTA DE MADEIRA PARA VERNIZ, SEMI-OCA (LEVE OU MÉDIA), PADRÃO POPULAR, 70X210CM, ESPESSURA DE 3,5CM, ITENS INCLUSOS: DOBRADIÇAS, MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE BATENTE, FECHADURA COM EXECUÇÃO DO FURO	und	0,552	1	0,55
4.3	94570	JANELA DE ALUMÍNIO DE CORRER COM 2 FOLHAS PARA VIDROS, COM VIDROS, BATENTE, ACABAMENTO COM ACETATO OU BRILHANTE E FERRAGENS	m ²	0,276	5	1,38
4.4	94569	JANELA DE ALUMÍNIO TIPO MAXIM-AR, COM VIDROS, BATENTE E FERRAGENS	m ²	0,276	1	0,28
5 PISOS E REVESTIMENTOS						
5.1	97096	CONCRETAGEM DE RADIER, PISO DE CONCRETO OU LAJE SOBRE SOLO, FCK 30 MPA - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO	m ³	0,411	5,54	2,28
5.2	101727	PISO VINÍLICO SEMI-FLEXÍVEL EM PLACAS, PADRÃO LISO, ESPESSURA 3,2 MM, FIXADO COM COLA	m ²	0,171	36,95	6,32
6 PINTURA E ACABAMENTO						

5.1	88485	FUNDO SELADOR ACRÍLICO, APLICAÇÃO MANUAL EM PAREDE, UMA DEMÃO	m ²	0,0666	259,2	17,26
5.2	88489	PINTURA LÁTEX ACRÍLICA PREMIUM, APLICAÇÃO MANUAL EM PAREDES, DUAS DEMÃOS	m ²	0,1631	259,2	42,28

PONDERAÇÕES

7.1	100066	ARMAÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES DE CONCRETO, EXECUTADA COMO ARMADURA POSITIVA DE LAJES, TELA Q-196	kg	0,026	2068,92	53,79
7.2	91603	ARMAÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES DE CONCRETO, EXECUTADA COMO REFORÇO, VERGALHÃO DE 10,0 MM DE DIÂMETRO	kg	0,049	229,88	11,26

Total parcial (H) 384,79

7.3	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS		VB	8% do total parcial	30,78
7.4	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS		VB	12% do total parcial	46,17
				Total geral (H)	461,75