

WALLACE ROBERTO SILVA DORNELAS

**PROJETO COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DE SOLUÇÕES
ARQUITETÔNICAS DE HABITAÇÕES EM EDIFÍCIOS VERTICAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Andressa Carmo Pena Martínez

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D713p
2023

Dornelas, Wallace Roberto Silva, 1993-
Projeto computacional para geração de soluções
arquitetônicas de habitações em edifícios verticais / Wallace
Roberto Silva Dornelas. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (84 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Andressa Carmo Pena Martinez.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2023.

Referências bibliográficas: f. 81-84.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.099>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arquitetura de habitação - Projetos e plantas.
2. Modelagem paramétrica. 3. Projeto auxiliado por computador.
4. Projeto arquitetônico - Processamento de dados.
5. Programação visual (Computação). 6. Edifícios. I. Martinez,
Andressa Carmo Pena, 1982-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 728.314

WALLACE ROBERTO SILVA DORNELAS

**PROJETO COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DE SOLUÇÕES
ARQUITETÔNICAS DE HABITAÇÕES EM EDIFÍCIOS VERTICAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Andressa Carmo Pena Martínez

APROVADA: 07 de novembro de 2023.

Assentimento:



Documento assinado digitalmente
WALLACE ROBERTO SILVA DORNELAS
Data: 06/03/2024 16:02:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Wallace Roberto Silva Dornelas
Autor



Documento assinado digitalmente
ANDRESSA CARMO PENA MARTINEZ
Data: 06/03/2024 15:53:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andressa Carmo Pena Martínez
Orientadora

*Ao Léo: onde quer que esteja, que seu sorriso ainda
esteja sempre presente e que esteja muito feliz.*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à minha mãe, Maria das Graças, por todo apoio incondicional em minhas empreitadas, sempre me incentivando a seguir em frente mesmo com todas as dificuldades e a sempre buscar um futuro melhor. Assim como meu diploma de Arquiteto e Urbanista era dela, assim também o é o diploma de Mestre.

À minha queridíssima orientadora, Andressa, por toda a jornada, insistindo na minha capacidade e pacientemente me levando para uma direção que eu, sozinho, não conseguiria enxergar. Que ainda possamos construir novos desafios juntos e que nossa parceria siga o caminho que seguiu nos últimos sete anos, com novas ousadias.

Aos amigos que nunca me abandonaram, por todo o apoio e companheirismo em todos os momentos, em todos os altos e baixos. Alex, Ademir, Beto, Carol, Fernanda, Gabi, Mafê, Marcelo, Renê, Robson, Thiago, Túlio e todos os demais que também moram no meu coração: vocês tornaram essa aventura possível.

Ao Nó.Lab, por todos os anos de conhecimento e de busca por aventuras na tecnologia. Aos companheiros do passado e do presente do laboratório, minha eterna gratidão por compartilharem tantos desafios e aprendizados. Nominalmente, agradeço à professora Denise, que me orientou nas primeiras ICs e se tornou um pilar, central em toda minha formação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (PPGau-UFV) e ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU-UFV), por todo o acolhimento ao longo de todos estes anos, com ênfase no agradecimento a seus funcionários e corpos docentes, pelo apoio, pelas conversas e pelo ambiente de aprendizado

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa que possibilitou a realização dos trabalhos de pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do Programa.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) por mais uma etapa me acolhendo, e me permitindo ser parte de uma das maiores instituições acadêmicas do mundo, apesar de todas as dificuldades que a ciência e os cientistas enfrentam no nosso país.

“There can be no triumph without loss. No victory without suffering. No freedom without sacrifice.”

“Não existe triunfo sem perda, não há vitória sem sofrimento e nem liberdade sem sacrifício.”

John Ronald Reuel Tolkien

RESUMO

DORNELAS, Wallace Roberto Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2023. **Projeto Computacional para Geração de Soluções Arquitetônicas de Habitações em Edifícios Verticais**. Orientadora: Andressa Carmo Pena Martínez.

Com o crescente avanço do uso de ferramentas computacionais para auxiliar nas mais diversas áreas, pondera-se sobre a possibilidade de aplicar tais recursos para agilizar e potencializar a abrangência de processos que, manualmente, seriam muito mais dispendiosos. A pesquisa centra-se na exploração dessa possibilidade, buscando apropriar-se dos recursos de programação visual, através do software Grasshopper, para gerar um algoritmo que auxilie no processo de projeto de Arquitetura de edificações verticais, principalmente em torno das seguintes questões: sendo a habitação um dos temas de maior interesse acadêmico e sendo o acesso à habitação uma questão tão emergente, como podemos nos utilizar de um código pra diversificar as soluções de projeto, de forma a fugir das plantas-tipo na verticalização, para direcionar a solução de cada unidade habitacional para a própria pessoa que a utilizará como residência. Para endossar nossas reflexões, discutimos sobre questões referentes ao Open Building, que defende uma Arquitetura aberta e mutável, voltada para integrar aos seus usuários e a seus arredores; sobre questões de customização, que é uma possibilidade que vem sendo explorada por designers de produtos para endereçar suas soluções diretamente para as demandas e preferências do usuário; e sobre as principais vantagens de se aplicar um processo projetual complexo em uma interface computacional, beneficiando-se de tecnologias presentes nos dias de hoje, como ferramentas paramétricas e softwares de base BIM, que possibilitam o máximo de integração entre modelo virtual e propriedades específicas sobre a sua contraparte do mundo real, como propriedades de material, coeficientes de resistência, dentre outros. Nossa pesquisa analisa uma série de ferramentas existentes para embasar uma ferramenta própria, destinada a sanar essa questão da variabilidade de soluções de edifícios verticais, que depois será aplicada em um exercício projetual, para explorar seu potencial.

Palavras-chave: Projeto computacional. Projeto paramétrico. Open Building. Customização. Edifícios verticais.

ABSTRACT

DORNELAS, Wallace Roberto Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2023. **Computational Design for the Generation of Architectonic Solutions for Housing in Vertical Buildings.** Adviser: Andressa Carmo Pena Martínez.

With the growing usage of computational tools to assist in the most various areas, we ponder the possibility of applying such resources to speed up and enhance the scope of processes that would be much more costly manually. The research focuses on exploring this possibility, seeking to appropriate visual programming resources, through the Grasshopper software, to generate an algorithm that assists in the design process of vertical building architecture, mainly around the following questions: being housing one of the topics of greatest academic interest and being access to housing such an emerging issue, how can we use a code to diversify project solutions, in order to escape from typological floor plan in vertical buildings, to direct the solution of each housing unit to the person who will use it as a residence. To endorse our reflections, we discuss topics related to Open Building, which advocates an open and mutable architecture, aimed at integrating it with its users and its surroundings; about customization, which is a possibility that has been explored by product designers to address their solutions directly to user demands and preferences; and about the main advantages of developing a complex design process in a computational interface, benefiting from technologies present today, such as parametric tools and BIM-based software, which allow maximum integration between virtual model and specific properties about its real-world counterpart, such as material properties, resistance coefficients, among others. Our research analyzes a series of existing tools to base our own tool, aimed at solving this issue of variability of vertical building solutions, which will later be applied in a design exercise, to explore its potential.

Palavras-chave: Computational design. Parametric design. Open Building. Customization. Vertical buildings.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. OBJETIVOS	13
1.2. METODOLOGIA.....	13
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2. REVISÃO.....	16
2.1. PROCESSOS COMPUTACIONAIS DE PROJETO	16
2.2. OPEN BUILDING	22
2.3. CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA	25
2.3.1. PRÉ-FABRICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	40
2.3.2. FABRICAÇÃO DIGITAL E INDÚSTRIA 4.0	41
3. METODOLOGIA.....	44
3.1. FERRAMENTAS DE ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA	45
3.1.1. PLACE	46
3.1.2. TESTFIT	50
3.1.3. PARAMETRIC SOLUTIONS	53
3.2. GERAÇÃO DE PLANTAS	55
3.2.1. FINCH 3D	55
3.2.2. ARCHITECTURES	57
3.2.3. PLANFINDER	60
3.3. CONCLUSÕES	61
4. RESULTADOS.....	63
4.1. ALGORITMO	63
4.1.1. ESTUDO DE VIABILIDADE.....	63
4.1.2. SUBDIVISÃO EM UNIDADES.....	67
4.2. APLICAÇÃO.....	71
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
REFERÊNCIAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

Analisando o contexto habitacional no Brasil, observa-se um déficit habitacional que, segundo a Fundação João Pinheiro, era de 5,8 milhões de moradias em 2019, com tendência a aumentar, conforme informações no web site do Governo Federal (Brasil, 2021). E a possibilidade de se projetar uma unidade habitacional voltada a atender individualmente a cada usuário, com demandas, necessidades e perfis distintos, nos moldes tradicionais da metodologia de projeto parece não ser possível, como, por exemplo, no Programa Minha Casa Minha Vida em 2009, que atuou criando um modelo padrão de habitação e replicando-o indefinidamente, com abordagem mais interessada em quantidade do que em qualidade. Não que esses conceitos tenham necessariamente se opor, mas no contexto geral da implementação do MCMV, a tendência do foco se apresentou mais inclinada para o primeiro do que para o segundo. Mas essa visão pode ser modificada ao considerarmos o uso das ferramentas computacionais. A busca pelo uso de tais recursos para geração de soluções arquitetônicas tem sido muito estudada nos últimos anos, mas a sua aplicação tende a concentrar-se em projetos de tipologia térrea, de residências unifamiliares, deixando uma lacuna quando se trata de soluções em edifícios multifamiliares verticalizados. O desafio passa a ser, principalmente, a implementação de um novo raciocínio: o da estruturação de um algoritmo que possibilite conceber, estruturar e analisar diferentes soluções para edifícios habitacionais verticalizados.

Desde a década de 1960, discutimos os termos design digital, design computacional e design algorítmico, entre outros (Caetano *et al.*, 2020). Essas terminologias não são nada mais do que tentativas de abordar o mesmo tema, precisamente o uso de computadores como ferramenta para os processos de design. De acordo com Caetano, Santos e Leitão (2020), nas últimas duas décadas, as técnicas de design computacional têm sido aplicadas na Arquitetura com foco em novas abordagens baseadas em computação, como simulações, otimizações e novos métodos de fabricação. Além disso, segundo eles, as explorações da computação na Arquitetura têm avançado por meio da automação de procedimentos de design, distribuindo tarefas do projeto e gerenciando grandes volumes de informações, lidando com alterações nos projetos de forma rápida e flexível, e auxiliando nos processos de busca de formas por meio de feedback automatizado.

Outro aspecto de nossas questões diz respeito ao conceito de Open Building. Definido por Habraken (1961) e estudado detalhadamente Kendall (1999), o Open Building é uma abordagem de design que tenta possibilitar o uso a longo prazo do edifício, para diferentes perfis familiares à medida que os anos passam e para a mesma família à medida que mudam suas necessidades devido ao passar do tempo. Para alcançar esse objetivo, eles pensam em um edifício composto por várias camadas, que são agrupadas em dois níveis principais: o Suporte (ou Esqueleto) e o Preenchimento (Avalone; Fettermann, 2020; Habraken, 1961; Kendall, 2004). O Suporte é definido a parte mais "sólida" do edifício, como estrutura, acessos e áreas de circulação comuns, enquanto o Preenchimento pode ser o interior de cada unidade habitacional, paredes e até sistemas de encanamento, que podem ser projetados de forma mais flexível, permitindo futuras intervenções (Kendall, 2004). No Open Building, essas diferentes camadas levam em consideração seus ciclos de vida separadamente, e não apenas do edifício como um todo, e isso pode ser usado para projetar cada uma das camadas como partes separadas de uma solução de design complexa.

Diante desse cenário, a abordagem utilizada para se pensar num projeto de Arquitetura se beneficia com a possibilidade de utilizar ferramentas potencializadoras da experimentação, como as algorítmico-paramétricas, na medida em que favorecem soluções direcionadas para os seguintes problemas: o que pode ser alcançado a partir do momento que o projetista consegue ampliar a diversidade de soluções, dentro de uma mesma lógica processual? É possível quebrar o paradigma das plantas-tipo como solução para edificações de múltiplos pavimentos? Este trabalho procura mostrar que, apropriando-se do potencial dos processos computacionais de projeto, podem-se produzir edificações residenciais verticalizadas com potencial de customização, ampliando a variabilidade de soluções de habitação e não apenas a solução de pavimentos-tipo.

Nos últimos anos, dentre todas as tipologias arquitetônicas, habitação é a que mais recebe atenção nas pesquisas sobre flexibilidade, sendo as que conciliam processos de projeto a flexibilidade as mais comuns (Costa; Logsdon; Fabricio, 2017). Enquanto os termos "flexibilidade" e "customização", conforme será discutido adiante, englobam debates acadêmicos quanto à sua definição, o enfoque deste trabalho é em explorar como esses quesitos, que acabam recaindo numa necessidade de se

produzir diversas possíveis soluções, podem se beneficiar de processos computacionais de projeto.

Quando se trata de gerar variabilidade de soluções, o processo manual apresenta limitações quanto ao tempo, à precisão, ao número de variações (Chaszar; Joyce, 2016). Essas limitações podem ser enfrentadas com métodos digitais de design generativo, além de possibilitar que o tempo poupado seja dedicado a outros aspectos do processo de projeto, o que possibilita alcançar soluções mais complexas (Chaszar; Joyce, 2016).

Outro aspecto que traz a atenção dos arquitetos para as ferramentas computacionais são as crescentes preocupações com os impactos ambientais da Arquitetura, que requerem cuidados quanto à gestão e economia de materiais, eficiência energética, conforto térmico, que podem ser estudados, avaliados e otimizados através das ferramentas computacionais que simplificaram o estudo dessas questões. (Caetano; Leitão, 2020).

Na perspectiva de Caetano e Leitão (2020), a adoção de novas tecnologias para a prática da Arquitetura, a princípio vistas com rejeição, é uma questão de tempo, à medida que vão se tornando mais comercialmente viáveis. Desta forma, é possível pensar que um modelo de solução projetual que vise diversificar soluções em unidades de apartamento em edifícios verticais, se hoje é visto com desconfiança, no futuro poderá ser algo mais cotidiano. “Este ciclo é recorrente e, a cada iteração, várias direções de pesquisas relacionadas são perseguidas, como é perceptível nas publicações científicas e conferências internacionais associadas às tecnologias da época” (Caetano; Leitão, 2020, p. 8).

Levando-se em conta, portanto, as questões problemáticas referentes à tentativa de solução padronizada das plantas de apartamento e, de outro lado, a possibilidade de se customizar as soluções voltadas para demandas individuais através de ferramentas paramétricas, restaria agregá-las a quesitos quantitativos, de forma que operemos dados e estimativas orçamentárias referentes aos projetos de Arquitetura. Para isso, atualmente dispomos de tecnologia BIM em diversos *software*, que já é utilizada pela maioria das empresas de Arquitetura, engenharia e construção (Eastman *et al.*, 2011). A vantagem dessa tecnologia vinculada ao presente estudo é a possibilidade de se obter em tempo real diversas informações relevantes, como tipo de materiais, quantitativos de custo, qualitativos de materiais etc., mesmo enquanto exploramos possibilidades geradas pelas ferramentas paramétricas, visto que hoje

podemos contar com recursos de interoperabilidade entre os *softwares* BIM e essas ferramentas.

Desta forma, contando com a possibilidade de se conciliar métodos de concepção projetual que garantam grande variabilidade de soluções, uma análise quanto a consumo de material e exploração de processo generativo, o trabalho justifica sua relevância com base no avanço sobre essas questões, em particular no que se refere ao projeto de edifícios verticais de apartamentos que, por apresentar um caráter mais complexo em sua solução, podem se beneficiar grandemente das ferramentas computacionais para organizar o processo projetual e estudar uma diversidade de soluções.

1.1. Objetivos

A) Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo de geração computacional de projeto de edifícios verticais que permita variabilidade de soluções de planta, fugindo da solução em plantas-tipo.

B) Objetivos Específicos

- i) Estudar e compreender os processos computacionais de projeto, bem como o uso de ferramentas paramétricas na Arquitetura, de forma a ampliar os horizontes de possibilidades de soluções.
- ii) Sistematizar *plugins*, *softwares* ou outras ferramentas que aprimorem e incrementem funcionalidades dos *softwares* utilizados, ou que possibilitem interoperabilidade entre eles, ou ainda que busquem soluções de projeto através de recursos tecnológicos.
- iii) Elaborar um modelo algorítmico-paramétrico de geração computacional de soluções arquitetônicas, que se vincule a softwares de base BIM.

1.2. Metodologia

A abordagem metodológica utilizada nesta pesquisa é a *Design Science Research (DSR)*, que pode ser entendida como uma forma de produção de conhecimento que envolve o desenvolvimento de artefatos inovadores, destinados a solucionar problemas enfrentados no cotidiano (Dresch *et al.* 2015). Segundo Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015, p. 119) a pesquisa conduzida centrada em *Design Science* apresenta as etapas a seguir: (1) Identificação do problema; (2) Conscientização do problema e Revisão Sistemática de Literatura; (3) Identificação dos artefatos e configuração do classes de problemas; (4) Propostas de artefatos para resolver problemas específicos; (5) Projeto do artefato selecionado; (6) Desenvolvimento do artefato; (7) Avaliação do artefato; (8) Explanação sobre aprendizados alcançados; (9) Conclusões; (10) Generalização para uma classe de problemas; e (11) Comunicação dos resultados.

A partir dessa estruturação, foi utilizado o seguinte modelo no tocante ao desenvolvimento da pesquisa:

a) **Revisão de Literatura**, a partir de consultas em fontes secundárias, tais como artigos, livros, teses e dissertações, nacionais e estrangeiros, a fim de estabelecer o estado-da-arte das temáticas abordadas ao longo da pesquisa, principalmente referente aos processos computacionais de projeto e sobre o Open Building, mas também discussões sobre customização, geração automatizada de soluções arquitetônicas, métodos generativos, aplicações das ferramentas paramétricas nesse processo e assuntos pertinentes a essa temática, com a finalidade de se compreendê-la de forma mais aprofundada. Como procedimento, envolve fases de planejamento e síntese. (Fases 2 e 3, acima citadas.)

b) **Estudo de referências**, com coleta e análise de outras soluções existentes no cenário atual da Arquitetura, principalmente para fomentar discussão sobre ferramentas e métodos abordados por essas soluções e como elas podem se relacionar, influenciar e diferir do trabalho intencionado com esta pesquisa. Como procedimento, também trata de fases de planejamento e síntese. (Fases 2 e 3, acima citadas.)

c) **Exploração prática**, com o desenvolvimento das soluções buscadas, ou seja: o algoritmo em si, através do *Grasshopper®* e do *Rhinoceros®*. Envolve método baseado em tentativa e erro, buscando referências de códigos já existentes e âncoras nas referências analisadas na Etapa B, anterior. Ou seja, a exploração prática envolve os procedimentos de “construção do artefato” que, no nosso caso particular, diz

respeito à elaboração do código de algoritmos computacionais. (Fases 4, 5 e 6, acima citadas.)

d) **Avaliação**, caracterizada pela análise dos resultados obtidos e da aplicação do código num projeto hipotético. Tal avaliação terá como base os requisitos elencados durante a pesquisa, e podem levar em conta critérios como variabilidade de soluções e como o código pode auxiliar o projetista a encontrar suas soluções a partir de cada resultado. (Fase 7 acima citada.)

e) **Sistematização de resultados**, caracterizada pela discussão das sínteses dos resultados de todo o material produzido na pesquisa, no cunho teórico e nos produtos das experimentações práticas, a fim de criar diretrizes para posteriores estudos e práticas envolvendo os processos desenvolvidos. (Fases 8, 9, 10 e 11, acima citadas.)

Quanto aos recursos materiais, serão utilizados principalmente o espaço físico e os equipamentos disponíveis no Nú.Lab - Laboratório de Modelagem Digital do DAU-UFV, como os computadores destinados a pesquisas, e também o apoio da rede pessoal do laboratório, com outros estudantes de graduação e pós-graduação, professores, pesquisadores parceiros e etc., que porventura possam colaborar com o trabalho e com o desenvolvimento da pesquisa.

1.3. Estrutura da dissertação

Para cumprir os objetivos estabelecidos através da metodologia apresentada, a dissertação foi estruturada da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução geral, que apresenta o tema da pesquisa, suas problematizações e pressupostos, objetivos, metodologia e estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: Revisão de literatura apoiando-se em obras e autores que discorram a respeito dos temas de Processos Computacionais de Projeto, Open Building e Customização, propondo-se a estabelecer as potenciais vantagens em se aplicar este tipo de processo, e os paradigmas desse tipo de pensamento, com uma reflexão a respeito dos temas;
- Capítulo 3: Exploração da pesquisa através da metodologia estabelecida, discutindo e analisando as referências e estruturando cada etapa da elaboração do algoritmo, buscando alcançar nosso objetivo de desenvolver o algoritmo;

- Capítulo 4: Apresentação dos resultados, com o algoritmo elaborado na prática, apresentação do código e das suas diretrizes. Apresentação e avaliação dos resultados, soluções possíveis e discussões.
- Capítulo 5: Considerações finais, discussões sobre a pesquisa e possibilidades de desdobramentos futuros.

2. REVISÃO

2.1. Processos computacionais de projeto

Sabe-se que as Revoluções Industriais provocaram impactos pelo novo raciocínio que guiava os meios de produção. Nesse sentido, a discussão de Celani e Frajndlich (2016) acerca das mudanças impostas por cada etapa da esfera industrial ocidental aos processos da Arquitetura, e, principalmente, do impacto da chamada Quarta Revolução Industrial para a concepção de novas metodologias de projeção arquitetônica. Pela perspectiva dos autores, a sociedade se encontra num momento em que o raciocínio da fabricação em massa iniciada pela chamada Primeira Revolução Industrial não atende às demandas do mercado, de forma absoluta. Com a denominada Quarta Revolução Industrial, que está permeando os limites das esferas física, digital e biológica (Schwab *apud* Celani; Frajndlich, 2016), chegamos aos produtos únicos, não mais artesanais, mas direcionados à personalização. Personalização essa que segue um raciocínio matematizado e aplicado: geramos comandos de regras e parâmetros no computador de forma a obter uma ferramenta que nos dê possibilidades virtualmente ilimitadas dentro de uma mesma lógica que permite soluções personalizadas em processos voltados à produção massiva.

A prática tradicional na Arquitetura é, por natureza, personalizada de acordo com a demanda do usuário. No entanto, ainda está focada apenas em um único produto final. Por outro lado, apesar dos avanços nas tecnologias computacionais, como o design algorítmico e paramétrico, o setor da Construção Civil permanece mais inerte às mudanças de fabricação em larga escala relacionadas à fabricação digital, especialmente na América do Sul. Nesse contexto, ainda faltam experiências práticas que apliquem as reais possibilidades que o design computacional traz para a prática da Arquitetura nos dias atuais.

No entanto, ao contrário das outras três, a assim chamada Quarta Revolução Industrial apresenta, em seu sistema de produção, a característica de não se limitar apenas aos usos no setor industrial, pois a tecnologia pode ser acessada em massa, de forma simplificada e direcionada, por qualquer pessoa que possua acesso às ferramentas necessárias. Celani e Frajndlich (2016) citam Schwab (2016), que acrescenta que as “possibilidades serão multiplicadas pelo avanço de tecnologias emergentes como a inteligência artificial, robótica, a Internet das Coisas, veículos autônomos, impressão 3D, nanotecnologia, biotecnologia, ciência dos materiais, armazenamento de energia e computação quântica”¹ (Schwab *apud* Celani; Frajndlich, 2016, p.163, tradução nossa), e complementam que “o conhecimento de código aberto difundido pela internet e as tecnologias de impressão 3D apresentam um provocante ponto de inflexão para a relação entre Arquitetura e sociedade.”² (p.166, tradução nossa).

Antes da Primeira Revolução Industrial, os processos de produção eram predominantemente artesanais, e acabavam sendo personalizados, uma vez que não era possível estabelecer controle de qualidade para produzir objetos idênticos das mãos do mesmo artesão. De acordo com Celani e Frajndlich (2016), com o surgimento de máquinas especializadas, a produção em massa entrou em cena, o que significa uma produção em larga escala de objetos idênticos. No entanto, com o advento dos computadores, surgiram outros processos computacionais de design e fabricação. Conforme afirmam Celani e Frajndlich (2016), isso permitiu o uso de máquinas não especializadas para produzir também objetos não idênticos, como robôs industriais e outras máquinas controladas por computador (ou CNCs). A versatilidade da maquinaria possibilita explorar resultados novos e até únicos, direcionados a problemas específicos e necessidades específicas (Celani; Frajndlich, 2016; Celani; Pupo, 2008; Kolarevic; Duarte, 2019).

1 No original: [...] these possibilities will be multiplied by emerging technology breakthroughs in fields such as artificial intelligence, robotics, the Internet of Things, autonomous vehicles, 3-D printing, nanotechnology, biotechnology, materials science, energy storage, and quantum computing. (SCHWAB, 2016, *apud* CELANI; FRAJNDLICH, 2016, p.163)

2 No original: “Open source knowledge widespread by internet and 3D-printed technologies pose a provocative turning point to the relationship between architecture and society.” (CELANI; FRAJNDLICH, 2016, p.166)

O termo “Customização em Massa” (CM) foi definido por diversos autores, conforme explicam Celani e Pupo (2008), para definir o método que “não se destina a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constitui-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes.” (p.31). Citam, também, o professor José Pinto Duarte que, em sua tese de doutorado, em 2001, utilizou o termo referindo-se a um raciocínio de projeto arquitetônico, para habitações. A Customização em Massa, porém, extrapola a definição industrial e o contraponto que faz com a Produção em Massa (Di Sivo; Angelucci, 2012). Os dois termos, inclusive, costumam ser usados como opositores, mas podem ser coligados, numa lógica que vise otimizar gasto material e variabilidade, concomitantemente. Esse raciocínio, atualmente, é vinculado à pré-fabricação, que garante a produção de um mesmo objeto em dimensões modulares que podem ser combinados e recombinaos de variadas formas, possibilitando redução de tempo e de custo, por exemplo, numa obra da construção civil.

Com base nos conceitos de Customização em Massa vistos acima, considera-se potencializá-la com o uso de ferramentas de modelagem paramétrica, como o *Grasshopper*³, que utiliza uma lógica algorítmica, e possibilita a exploração de configurações variadas dentro de um mesmo raciocínio. Portanto, na Arquitetura podemos potencializar a concepção de habitações obedecendo um conjunto de regras preestabelecidas, de forma semelhante ao que sempre foi feito analogicamente. Porém com horizontes ampliados e diversificados graças à atuação de uma ferramenta que calcula e simula variadas possibilidades em prazos e soluções mais eficientes e diversas, visto que, além da visão e conhecimento de mundo do profissional, a geração computadorizada de modelos arquitetônicos pode conjugar diferentes áreas do conhecimento científico, como questões estruturais, térmicas, ambientais, de iluminação, ventilação, dentre tantas outras.

O potencial de usos das ferramentas algorítmicas e paramétricas relaciona-se à sistematização de lógicas no processo de projeto. Não à lógica da variação de

3 *Grasshopper*[®] é um recurso de programação visual – que não requer conhecimento de linguagens de programação do usuário – incluso no software de modelagem 3D *Rhinoceros*, que possibilita a utilização de raciocínio algorítmico para modelar, experimentar, analisar e otimizar, dentre diversos outros recursos.

(Adaptado de <www.grasshopper3d.com>, tradução nossa)

dimensões, mas como um espaço adaptável, sujeito às transformações que vêm com o tempo (Di Sivo; Angelucci, 2012). O próprio setor habitacional tem sentido a demanda por tais abordagens, com soluções de qualidade, com custo acessível, mas ainda customizáveis (Marchesi; Matt apud Gazel *et al.*, 2018). Em razão disso, a Produção em Massa, que no passado mostrou-se uma maneira eficaz de redução dos custos, não mais se apresenta desta maneira, levando em conta a possibilidade de se utilizarem máquinas mais versáteis: máquinas de controle numérico computacional capazes de produzir indefinidas quantidades de moldes, formas e peças para diferentes objetos que, por sua vez, podem ter as finalidades mais diversas.

Além dessas questões, visando explorar uma abordagem mais concreta do método de customização a ser estudado, aborda-se o diálogo com a tecnologia BIM, que possibilita, dentre outros, a extração de dados quantitativos e qualitativos de materiais e estruturas, checagem de conflitos e interoperabilidade com outros *softwares*, inclusive ferramentas paramétricas de modelagem, como o próprio *Grasshopper*®, que se vincula ao Graphisoft *Archicad*® e, em versões atualmente em fase de implementação, ao Autodesk *Revit*®. Como apontam Andrade e Ruschel (2011), a escolha do BIM pode basear-se em sua “habilidade de gerar documentos finais de construção, sem precisar de usar outras ferramentas complementares”. O recurso do BIM, portanto, entra como uma etapa de direcionamento e avaliação da variabilidade do projeto, com os requisitos de materiais e custos para circunscrever a customização. Além de facilitar o gerenciamento para a documentação, com direito a desenhos de detalhamento técnico e tabelas de quantitativo, otimização e demais recursos.

Os avanços tecnológicos têm mudado a forma de se projetar em Arquitetura por meio de processos computacionais e paramétricos, e a customização em massa tem emergido como uma alternativa eficaz para contrapor a pré-fabricação e padronização atuais (Bianconi *et al.* 2019). Não que a pré-fabricação deva ser substituída, mas sim incorporada aos processos de customização de forma a enriquecer e aprimorar o processo de projeto graças às estratégias de customização. Com o uso de tecnologias como o BIM é possível que estudemos todo o processo de construção de forma a avaliar a vida útil de uma edificação e de suas partes, (Mostafa *et al.*, 2020) de forma a lidar com possibilidades, variações e a antever modificações futuras feitas por usuários distintos ou com novas necessidades.

Essas necessidades distintas sob a ótica da customização em massa, que essencialmente traz o usuário final como elemento participativo no processo de tomada de decisões de projeto, em que traria inputs como variáveis em um processo já estruturado, de forma a direcionar o produto final para suas próprias necessidades subjetivas (Kolarevic; Duarte, 2019).

Desde que os computadores passaram a ser percebidos como ferramentas de trabalho, existem suas aplicações nas mais diversas áreas. Na Arquitetura, desde os anos 1960, já se discute sobre os termos design digital, design computacional, design algorítmico, dentre outros (Caetano; Santos; Leitão, 2020). De acordo com Caetano, Santos e Leitão (2020), nas últimas duas décadas, técnicas do design computacional foram aplicadas no processo de projeto de Arquitetura mais direcionadas a abordagens baseadas em computação, como simulações, otimizações e novos métodos de fabricação, do que puramente a automatização de representação gráfica de Arquitetura, como o CAD. Ainda de acordo com esses autores, as explorações da computação em Arquitetura têm se enveredado mais por quatro aspectos principais:

- Automatização de procedimentos de projeto;
- Distribuição de tarefas de projeto e gerenciamento de grandes quantidades de informação;
- Modificações nos projetos de maneira rápida e flexível;
- Processos de *form-finding* através de feedback automatizado.

Isso implica o uso e aplicações da computação nos processos de concepção, análise e gerenciamento (Caetano; Santos; Leitão, 2020).

Caetano, Santos e Leitão (2020) demonstram como o termo mais utilizado em publicações acadêmicas, dentre os diversos termos derivados do Design Computacional, é “Design Paramétrico”, seguido por “Design Generativo”, “Design baseado em Performance” e “Design Algorítmico”. Como “paramétrico”, “generativo” e “algorítmico” estão mais essencialmente próximos, os autores optam por explorar a taxonomia desses três, expondo sua evolução semântica temporal nas diversas produções e trabalhos existentes.

De acordo com as definições apresentadas no estudo supracitado, os conceitos são estabelecidos conforme se segue:

Design Paramétrico: Abordagem de projeto que se baseia no uso de parâmetros. Utilizando-se aqui da definição de parâmetro enquanto variável

empregada para expressar determinada característica do modelo digital, durante o processo de modelagem. Por exemplo, em *software* de base BIM podemos atribuir variáveis a uma parede, como espessura, altura, comprimento etc. Tais variáveis atuam no modelo como parâmetros para definir essas propriedades, sendo possível alterá-las a qualquer momento durante o processo e essas alterações repercutem por todo o modelo.

Design Algorítmico: Processo de projeto baseado no uso de algoritmos. A definição de algoritmo consiste em um conjunto de instruções matemáticas que ajudam a responder um problema. Ainda de acordo com os autores, Design Algorítmico equivaleria a Design Generativo, porém o uso da expressão design algorítmico é um pouco mais específico. Um exemplo é o uso de *software* como o *Grasshopper*® e o *Dynamo*® para projetar Arquitetura. Uma vez que cada etapa do projeto pode ser associada a uma nova etapa subsequente, um algoritmo é aplicado para delinear essas etapas dentro do processo.

Ainda na discussão proposta pelos teóricos, esses três termos acabam possuindo muitos aspectos em comum e, portanto, mesclados, de modo que a compreensão de seus significados talvez não se esgote aqui. A concepção que será fundamental para nosso trabalho são as explícitas distinções entre design algorítmico e paramétrico. Isso porque, para nossa pesquisa, esses dois conceitos são utilizados juntos, aplicando-se características do algorítmico e do paramétrico, justamente, naquele que chamaremos de Design Algorítmico-Paramétrico. Busca-se elaborar um processo algorítmico para projetar, mas fazendo uso de parâmetros, que servem para explorar soluções, buscar possibilidades e analisar diversos resultados prováveis dentro de uma mesma lógica estruturada algorítmicamente.

Por possibilitar obter diversos artifícios que respeitam uma mesma estratégia de solução, uma mesma lógica projetual, a partir de determinados parâmetros que atuam como as variáveis através das quais os produtos finais são obtidos, evidencia-se que o processo algorítmico-paramétrico viabiliza mudanças na forma de se projetar. Com um processo dessa natureza, torna-se possível projetar edifícios com organização mais complexa de maneira mais rápida, fugindo da solução em tipos únicos— aqueles que atendem (ou não atendem) de forma genérica à necessidade de moradia – e avaliando diversas alternativas, graças à potencialidade computacional.

2.2. Open Building

Para orientar as investigações nesse sentido, trouxemos algumas considerações feitas em estudos sobre o conceito de Open Building, conforme estudado por Stephen Kendall, que justamente possuía como enfoque resolver situações de projetos que visavam atender a demandas distintas e variadas ao longo da vida útil de uma edificação. O conceito de Open Building vem sendo discutido há algumas décadas e continua oferecendo respostas para problemas com características bastante atuais, como precisamente a flexibilidade na Arquitetura e a problemática da customização em massa como recurso dos processos computacionais de projeto.

O Open Building refere-se a um conceito da Arquitetura no qual a edificação aparece como um espaço “aberto”, a ser ocupado, modificado, alterável pela presença dos usuários, e permite diversas compreensões, de caráter desde social até técnico.

Os principais aspectos do conceito do Open Building recaem sobre o fato de a edificação ser organizada em dois grupos distintos: o Suporte e o Recheio.

O Suporte — às vezes também chamado de Esqueleto — (Avalone; Fettermann, 2020) seria a parte mais rígida e imutável da edificação. Neste grupo entram aspectos fundamentais como a estrutura, a circulação externa, as instalações elétricas, as instalações de gás, o cabeamento e as vedações fixas. (Kendall; Teicher, 2000).

O conceito de Suporte está diretamente ligado aos estudos feitos por N. John Habraken em sua Teoria dos Suportes — teoria da qual se origina o nome definido por Kendall no Open Building (De Paris; Lopes, 2018). O próprio contexto da edificação também faz parte intrinsecamente dela própria e, desta forma, espaços públicos, áreas comuns, acessos, escadas e outras instalações presentes no lote também fazem parte dessa distinção entre Suporte e Recheio, sendo distinguíveis a partir da mesma regra: as informações de caráter mais universal, fixas, permanentes, caracterizam-se como Suporte (Kendall; Teicher, 2000).

O Suporte não é um mero esqueleto. Não é neutro, mas sim uma Arquitetura possibilitadora. É mais como um local servido, ambientalmente protegido dentro de uma paisagem construída: um Suporte é uma instalação física que oferece espaço e a possibilidade de construir moradias com o mínimo de restrições possível, exigindo o mínimo de trabalho possível. Uma parcela de terreno com uso regulado,

restrições de posição e tamanho de edificação é, na verdade, um tipo limitado de Suporte. Além disso, um novo tipo de desenvolvimento de casas em que o desenvolvedor convida os compradores a customizar os interiores é também um tipo de Suporte, assim como o são armazéns, escolas ou prédios de escritórios convertidos, em que cada unidade é individualmente determinada e depois vendida e alterada novamente para uma ocupação residencial.⁴ (Kendall; Teicher, 2000, tradução nossa)

Quanto ao conceito dos Recheios - ou *Infill* - no Open Building, é toda parte que pode - e deve - ser modificada pelo usuário. As vedações, as paredes, o acabamento, a posição dos ambientes, objetos, mobiliário e até mesmo o funcionamento (Kendall; Teicher, 2000). Basicamente, o *Infill* pode ser lido como a organização do espaço físico que o usuário exerce em seu espaço no contexto do Suporte.

Um sistema de Recheio não é uma série de produtos trazidos separadamente ao local, cada um cortado e instalado pelo seu próprio subempreiteiro. Antes, é um conjunto de produtos cuidadosamente pré-embalados e integrados, pré-fabricados sob demanda para determinada habitação e instalado como um todo. Um sistema de Recheio compreensível provém as partições, as instalações mecânicas e equipamentos, portas, acessórios, armários, acabamentos e outros elementos necessários para tornar um espaço completamente habitável em um edifício-base. Apesar de os Recheios e seus componentes não necessitem ser produzidos industrialmente, separar o Recheio do edifício base encoraja a adoção de processos industriais sofisticados, incluindo interfaces, logística, controle de qualidade e gerenciamento de informações de outros setores industrializados e orientados para o consumidor.⁵ (Kendall; Teicher, 2000, tradução nossa)

4 No original: "A Support is not a mere skeleton. It is not neutral, but is rather enabling architecture. It is more like a serviced, environmentally protected site within a built landscape: a Support is a physical setting that offers space and possibility to make dwellings with as few constraints as possible, while requiring as little work as possible. A serviced plot of ground with regulated use, building placement and size restrictions is, in fact, a limited sort of Support. Furthermore, a new row house development in which a developer invites buyers to customize dwelling interiors within constraints is also a kind of Support, as are converted warehouses, schools or office buildings in which each unit is individually determined and later sold and altered again to a residential occupancy."

5 No original: "An infill system is not an assortment of products brought separately to the site, each cut and installed by its own subcontractor. Rather, it is a carefully pre-packaged, integrated

Orientada pelas premissas do Open Building, a própria indústria poderia se voltar para produzir soluções mais integradas, que possibilitassem a recombinação e o rearranjo das montagens de acordo com as demandas dos usuários

Recaindo sobre a questão da parte técnica das instalações hidrossanitárias, ressaltamos alguns pontos iniciais. Sob a ótica normativa, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 5626, que foi atualizada em 2020, apenas aponta como critérios técnicos indispensáveis para as instalações de abastecimento, além de questões como a presença de reservatórios e a verificação da integridade do sistema, a vazão do fluido em seus pontos de interesse. Ou seja, não existe necessariamente um ângulo máximo ou mínimo para a tubulação, há apenas um coeficiente de vazão a ser observado e respeitado para o funcionamento ideal da instalação. Posto isso, a liberdade para se estender e ramificar as instalações pela edificação se abre, devendo-se apenas garantir que o fluxo será mantido e a norma atendida.

Kendall, em seus trabalhos, aponta para a integridade dos sistemas como parte indispensável para o bom funcionamento do Open Building. Por isso, existem diversos registros feitos por ele de soluções de sistemas, em que se analisavam a tecnologia empregada, a estratégia de instalação e o diálogo com outras instalações.

Uma questão levantada por Kendall (2004) é que a instalação pudesse ser resolvida e mantida dentro do “território” em que fosse instalada. Isso significa que uma tubulação de esgotamento de banheiro, por exemplo, não poderia cortar a laje e passar sobre o forro do vizinho de baixo. Da mesma forma, uma tubulação de abastecimento não poderia vir sob o piso do vizinho de cima. Com isso, as soluções para as instalações hidrossanitárias no Open Building são concebidas com vedações “ocas”, em que há um espaço reservado para elas dentro da própria unidade habitacional: os pisos elevados, os forros rebaixados e as vedações “sanduíche”, como o *drywall* e estruturas em *steel frame*.

set of products, custom prefabricated off site for a given dwelling and installed as a whole. Comprehensive infill systems provide the partitions, mechanical installations and equipment, doors, fixtures, cabinets, finishes and other elements needed to make a completely habitable space within a base building. Although infill systems and their components need not be industrially produced, separating infill from the base building encourages the adoption of sophisticated industrial processes, including interfaces, logistics, quality control and information management from other industrialized, consumer-oriented sectors.”

Kendall apresenta também algumas alternativas operadas no Japão e nos Países Baixos, onde houve implementações de habitações do Open Building, e onde algumas estratégias de sistemas *infill* foram exploradas. Para a realidade brasileira, seria necessário levar em conta questões de acesso a materiais e aos serviços, levando-se em conta que a tradição da construção civil no Brasil faz mais uso de concreto e alvenaria, que são métodos construtivos mais rígidos, com pouca margem para alterações rápidas. Nesse cenário, materiais como madeira, gesso e pré-fabricados podem ser opções que viabilizem a proposta.

2.3. Customização em massa

Segundo Smith (2019), a customização em massa (CM) é fruto das tecnologias digitais e da evolução dos maquinários de manufatura. De fato, Davis (1989), afirma que novas tecnologias capazes de proporcionar alta velocidade e especificidade no tratamento dos fluxos de informação permitirão o fim da condição de troca entre custo e customização. Assim, estabelece-se que a CM está intrinsecamente ligada à possibilidade de um fluxo de informações ágil para permitir que os processos operacionais sejam responsivos o suficiente para introduzir a necessidade do usuário final sem aumento significativo no custo de produção. Logo, pode-se afirmar que não é razoável que um produto customizado em massa seja produzido a partir de um sistema de produção tradicional utilizando técnicas artesanais, uma vez que a quebra no fluxo de informações inviabilizaria a proposta da estratégia.

Dado este cenário, segundo Piller (2019), existem duas principais vias estratégicas para a CM dentro da produção industrializada. A primeira, introduz as necessidades e desejos (*inputs*) do usuário final em fases mais avançadas da produção. Assim, a partir da montagem rápida e da recombinação de componentes padronizados pré-fabricados é possível criar produtos únicos, customizados e com custo acessível, possibilitado pela economia de escala na produção padronizada. A segunda via, refere-se à produção automatizada. Nesse caso, é possível materializar um produto físico diretamente a partir de um modelo virtual a partir da conversão desse modelo em informações numéricas que irão comandar o maquinário de manufatura. Desta forma, a flexibilidade na produção e alcance de variabilidade do

produto final torna-se maior já que os *inputs* do usuário final podem ser introduzidos em fases mais antecipadas da produção de produtos únicos.

De acordo com Piller (2019), essas estratégias permitem que os processos operacionais para a CM sejam flexíveis e estáveis o suficiente para atender à variedade de demandas com manutenção de custos. No entanto, especificamente na indústria da Arquitetura, engenharia e construção (IAEC), existe um baixo nível de adesão à processos industrializados na produção (Larsen, *et al.*, 2019; Smith, 2019; Avalone; Fettermann, 2019). De tal forma, a variabilidade da demanda, característica intrínseca da AEC ocorre a partir do envolvimento do cliente final no início da cadeia de produção, a partir de técnicas tradicionais e de forma fragmentada, o que requer a reorganização da cadeia de suprimentos todas as vezes que existe um novo projeto. Ou seja, a indústria da construção civil atende a variedade de demanda sacrificando a estabilidade da cadeia produtiva. Conforme será visto a seguir, a dificuldade da industrialização da IAEC está relacionada às especificidades da própria indústria e às características específicas das edificações enquanto produto.

No que tange o envolvimento do cliente final no processo de projeto customizável em massa, as interfaces digitais ganham um papel de destaque, uma vez que as tecnologias necessárias para a produção de habitações em massa, porém com alto nível de customização, são o design paramétrico, a fabricação digital e websites interativos para design, visualização e estimativas (Kolarevic; Duarte, 2019, p.6). Tecnologias como Realidade Aumentada (RA), Realidade Virtual (RV) e Realidade Mista (RM) se mostram como interfaces promissoras, devido ao alto nível de interatividade que permitem com o usuário. Se aplicadas em uma interface adequada, que corresponda ao perfil do usuário, essas tecnologias podem minimizar falhas de comunicação entre arquitetos e clientes finais. Nesse sentido, a linguagem técnica, muitas vezes utilizada por profissionais da construção civil, pode prejudicar o fluxo de informações intrínseco ao processo de projeto customizado em massa, o que dificulta a inserção do usuário, uma vez que essa linguagem não faz parte de seu repertório, na maioria das vezes (Souza; Imai; Azuma, 2018, p. 1).

Quanto à aplicação das tecnologias computacionais e de maquinário nos processos arquitetônicos, tanto a parte que afeta o processo de projeto quanto a que afeta o de produção influenciam nos aspectos decisórios de projeto e têm relevância para as discussões concernentes à Customização em Massa em Arquitetura.

O CAD, enquanto conceito, já possui uma diversidade de subconceitos arraigados, principalmente devido à evolução da computação nas últimas décadas e ao crescimento dos poderes de processamento. Atualmente, termos como Design Paramétrico, Design Algorítmico e Design Generativo são, por vezes, dissociados do próprio CAD, como se fossem coisas inteiramente distintas, quiçá até dissociado da computação enquanto auxílio para projetar, pelo fato de a ferramenta possibilitar outra forma de conceber o projeto, com um modo de raciocinar único e distinto.

Há um estigma, por parte de alguns autores, quanto às formas complexas que podem ser geradas por processos generativos, por serem caras ou impossíveis de construir (Veloso; Celani; Scheeren, 2018). Encontrar resistência a novidades não é raro e ocorre em todas as áreas. Portanto é de se esperar que processos de projeto que levem novas abordagens construtivas, com potencial de customizar, e utilizando novos materiais e técnicas, também se encontre barreiras. Ainda mais em um país com uma construção civil tão tradicional e conservadora como o Brasil.

Mas isso não impede que estudemos essas possibilidades, e discutamos esses aspectos. Existe uma tendência no mundo todo buscando explorar processos digitais de projeto junto a soluções customizadas de habitação. Estudos como o de José Duarte em 2001, com sua tese de doutorado, e o de Sara Eloy em 2018, que exploram, ambos, as Gramáticas da Forma, com o intuito de padronizar as soluções geradas por computador.

Junto com isso, vem todo o potencial que processos como o algorítmico trazem para processos de projeto, principalmente os de caráter customizável, devido ao fato de ser possível vincular aspectos qualitativos, de caráter objetivo, aos resultados de projeto a avaliá-los enquanto possibilidade. A exemplo, *plugins* como o Ladybug utilizados em conjunto com o Dynamo® ou Grasshopper®, trazem a possibilidade de se avaliar condições climáticas e ambientais e como isso afetaria o objeto arquitetônico. Esse tipo de processo, inclusive, se enquadra em um tipo específico de processo computacional: o denominado Design Baseado em Desempenho, que se baseia em dados de performance do projeto para otimizar aspectos da solução projetual, enquanto vinculado a um algoritmo (Caetano; Santos; Leitão, 2020). As possibilidades são muitas, e já são realidade.

No entanto, ao se falar sobre customização em massa na Arquitetura, existe uma questão importante a ser discutida no tocante à participação do usuário e à quantidade de alterações que podem ser feitas no projeto. Van Stralen (2018) traz a

visão de Negroponte (1975) e Norman (2004) sobre a atividade que ele denomina como “menu-picking”, referindo-se ao fato de o usuário selecionar uma opção dentre uma lista limitada, sem uma grande diversidade de soluções. Neste quesito, a própria abordagem de Kolarevic e Duarte (2018) quanto à democratização do design apresenta aspectos de “menu-picking”, quando apresenta possibilidades como o uso de websites com opções definidas por variáveis pré-definidas.

Primeiramente, denominar a possibilidade de o usuário escolher a cor da parede de um cômodo de sua casa como Customização em Massa apenas por essa mudança poder ser feita a partir de uma interface é uma simplificação do conceito. A customização deve ser, acima de tudo, sobre as soluções de projeto. Então não se trata de alterar aspectos cosméticos, mas sim de efetivamente projetar o espaço e atribuir-lhe características. O que se pode discutir, e não se espera chegar ao fim deste texto com uma resposta para isso, é o quanto um usuário, presumidamente leigo em soluções projetuais, será participativo na tomada de decisões. Este papel, a princípio, continua sendo do arquiteto.

Essa crítica de Negroponte e Norman quanto à limitação de opções refletindo em limitação de conexão e apego (Van Stralen, 2018), no entanto, soa mais como uma limitação da visão quanto às possibilidades que o ferramental computacional traz à tona. É verdade que não se trouxe ainda uma solução definitiva que se utilize desses recursos, assim como também é verdade que um sistema que permita uma grande variedade de soluções é algo de alta complexidade, mas tudo isso não passa de questão de tempo e avanço nos estudos.

Grandes empresas estão desenvolvendo novos recursos computacionais para a AEC, explorando a fundo esse potencial. A Autodesk lançou sua própria ferramenta de design generativo, utilizando o Dynamo como base, que permite otimizar diferentes variáveis de interesse no projeto baseado no rearranjo de layout, além de outras opções (Autodesk, 2021).

Agora, quanto às possíveis variações de design, existem questões a serem debatidas, e faz-se o convite à reflexão. Segundo Kolarevic (2018), a alteração de geometria definiria o que é Customização ou não. Entretanto, quais aspectos da geometria poderiam ser mudados? O perímetro? E baseado em quais critérios? Com quais limitações? Internamente? Externamente? É necessário responder a essas questões de forma codificada, na linguagem em que for elaborado o sistema. Aspectos como o posicionamento dos cômodos, a relação topológica entre eles,

podem ser alterados? Ou isso deverá ser definido previamente, por um arquiteto, que estabelecerá os melhores pontos com relação aos dados climáticos, aos fluxos de uso dos espaços, etc.?

A bem da verdade, todos esses questionamentos dependerão do contexto em que o projeto estiver sendo elaborado. Conforme sugerido por Friedman, Sprecher e Eid Mohamed (2013), um *framework* é necessário para cada projeto em que se utilize um sistema de customização em massa. Afinal, por mais que as discussões referentes a esse conceito sempre pareçam tratar de um único grande problema, a Customização em Massa deve ser vista como um processo que pode auxiliar a encontrar soluções diversificadas em contextos onde isso se aplique, e com a intenção de aumentar o escopo desses contextos.

Por exemplo, as Habitações de Interesse Social sempre ganham o foco de discussões sobre Customização em Massa quando contextualizadas no Brasil, e é de altíssima relevância que isso continue ocorrendo. Mas observe como as regras definidas para um *framework* de customização para um caso de HIS seria distinto para resolver, por exemplo, um edifício de apartamentos, ou um condomínio fechado. Ou seja, essas situações específicas trariam contextos próprios, que daria respostas diferentes para cada um daqueles questionamentos levantados anteriormente.

Ao falarmos de customização em massa, é inevitável a retomada a algumas outras estratégias de projeto vistas ao longo da historiografia da Arquitetura. Ressalta-se que a customização se atém a uma tipologia de projeto que em vários momentos da história da Arquitetura suscitaram grandes questões a essa disciplina: a habitação. É possível citar o movimento moderno como o período no qual os grandes nomes se ativeram, mais do que nunca, à questão da habitação, refletindo, de uma maneira até então inédita, o que, de fato, era o morar.

No período moderno, as habitações eram pensadas de maneira até então padronizada, o que fazia sentido naquele contexto que pressupunha uma produção em larga escala, motivada pelo grande déficit habitacional experimentado naquele momento, além de considerar um homem padrão, genérico, para o qual a habitação deveria servir. Evidentemente, esse tipo padrão já não faz mais sentido na contemporaneidade e, até mesmo no momento do próprio modernismo, já sofria duras críticas.

Apesar dessa produção estandardizada, já era possível encontrar, naquele momento, estratégias projetuais as quais pretendiam oferecer o mínimo de

variabilidade às habitações ou, pelo menos, torná-las o mais eficiente possível através de estratégias que flexibilizavam os espaços. É possível definir a casa flexível, segundo Till e Schneider (2005), como uma habitação que pode se adaptar às mudanças de necessidades do seu usuário, seja com a possibilidade de escolher por diferentes layouts antes da ocupação - cenário semelhante àquele colocado quando discutimos customização em massa - como também a chance de ajustar a casa ao longo do tempo, incorporando novas tecnologias, ajustando a partir de mudanças demográficas ou até mesmo mudando completamente o uso da edificação de residencial para qualquer outro uso.

Além do entendimento de flexibilidade posto em paralelo ao conceito e à prática de customização em massa, é válido mencionar o *Open Building*. Em linhas gerais, segundo Kendall e Teicher (2000), é um conceito em Arquitetura no qual a edificação é vista como um ente altamente mutável: trata-se de um sistema que possibilita a configuração, por exemplo, de unidades habitacionais adaptadas individualmente, ou seja, que permite ao habitante ocupar e modificar a sua unidade como lhe for mais conveniente, podendo-se variar, inclusive, as suas dimensões. O *Open Building* pressupõe um sistema que abarca desde questões sociais até técnicas da edificação, sugerindo controle e interdependência de todas os componentes envolvidos em um projeto e no uso de uma edificação ao longo da sua vida útil.

Ressalta-se que este conceito foi inicialmente proposto por John Habraken na década de 1960, e ainda hoje é explorado enquanto conceito e prática também associados à flexibilização.

De forma a interseccionar essas temáticas, é possível perceber que as estratégias de flexibilização, as quais incluem o *Open Building*, e também a customização em massa, buscam um objetivo semelhante: adaptar a habitação para a real necessidade dos usuários, de forma mais individualizada e personalizada, ou seja, oferecer certa variabilidade para os possíveis habitantes. Entendendo que essas estratégias projetuais buscam o mesmo objetivo, o que difere tais métodos? O que a ideia de customização em massa, temática amplamente discutida na contemporaneidade, difere da flexibilidade, pensada há mais de 100 anos na história da Arquitetura?

Kolarevic e Duarte (2019) afirmam que uma casa customizável em massa é definida parametricamente, projetada de forma interativa e pré-fabricada digitalmente. Ao falarmos tanto do design paramétrico, quanto da interação com o usuário a partir

de interfaces interativas e a fabricação digital, estamos falando de ferramentas até então recentes, alinhadas com o avanço tecnológico e que, possivelmente, distinguem a customização de outros processos já vistos e experimentados até então. Ressalta-se que o contexto contemporâneo é marcado pela forte presença dos processos de projeto computacionais em diversas áreas, onde se inclui a Arquitetura.

Com o avanço dos estudos na área de customização em massa na Arquitetura, questiona-se essas três possíveis bases da customização. Entende-se que a CM possui diversas variáveis, as quais estão intrinsecamente ligadas ao contexto para o qual se pensa esse processo, portanto diferenças culturais, sociais e, principalmente, tecnológicas variam de lugar para lugar, fazendo com que uma definição generalista da customização seja inapropriada. Colocar, por exemplo, que a customização em massa só é possível através da fabricação digital, excluiria muitos contextos os quais poderiam se apropriar de tecnologia local, por exemplo, para desenvolver a customização.

Como mencionado por Leite e Celani (2019) os trabalhos até então desenvolvidos com a temática de customização em massa se atém, quase que exclusivamente, à etapa de pré-configuração dos ambientes, isto é, com as abordagens limitando-se à uma customização na etapa de projeto ou de pré-ocupação. A partir disso, é possível se levantar a questão: considerando os processos hoje chamados de customização em massa em Arquitetura, é possível pensar e explorar a customização após o edifício entregue?

Dentro do escopo de teorias referentes à customização em massa, tal qual mencionado por Gilmore e Pine II (1997), existem diferentes tipos de customização onde, em certas tipologias, é possível que a mesma se dê após o produto ser entregue ao usuário final, o que significa que a customização se daria, de fato, pós-entrega do produto. Na Arquitetura, ainda existem poucos estudos que mencionam uma possível customização pós-produto. É plausível se pensar numa lógica de flexibilidade, já conhecida de outro momento, porém ainda são escassos os estudos que criem um diálogo entre customização pré e pós-ocupação, que poderiam fundamentar-se naqueles métodos já mencionados anteriormente e ligados à customização em massa: design paramétrico e/ou interface com o usuário e/ou fabricação digital.

Questiona-se, então: de que forma poderia se pensar a customização pós-produto? Ressalta-se que não existem respostas absolutas para tal questionamento, porém é possível fazer algumas reflexões e sugestões sobre essa questão. Um

caminho para se pensar a customização pós-produto seria embarcar no sistema e, posteriormente, já na habitação construída, alguns elementos os quais poderiam ser usados para personalizar o espaço ao longo do tempo. Exemplo disso seriam painéis, automatizados ou não, sensores, *smart materials* ou outros elementos que pudessem ser usados com a finalidade de customizar a habitação a partir de uma nova demanda dos habitantes que poderia surgir no decorrer do tempo. Uma outra possibilidade seria, a partir de parcerias com a indústria da construção civil e outros fabricantes, a criação de elementos de fácil montagem e produção, mas que poderiam ser customizados em massa a partir das novas demandas dos usuários. Essa estratégia poderia prever a fabricação de desde painéis customizados para separar ambientes dentro da habitação, a unidades de banheiro prontas totalmente customizadas para serem implantadas na residência.

Outra discussão levantada quando discutimos customização em massa, diz respeito à qualidade dos projetos desenvolvidos a partir de ferramentas digitais, nesse caso, através do design algorítmico-paramétrico. É possível avaliar um projeto pensado na lógica algorítmico-paramétrica? É possível classificá-lo como bom/ruim, adequado/inadequado? Como seria feita essa classificação? Baseada em quais parâmetros?

Junto aos desafios inerentes à customização devido ao seu teor inovativo, coloca-se a questão da qualidade dos resultados. Através das ferramentas algorítmicas, é possível obter soluções praticamente infinitas, porém que, não necessariamente, são soluções de qualidade, adequadas e resolutivas. Por isso, questiona-se se é possível obter uma avaliação das soluções e a partir de quais parâmetros tal avaliação é feita. Num primeiro momento, é possível sugerir que tal análise possa ser feita a partir do estabelecimento de algumas restrições, as quais seriam definidas pelo próprio projetista a partir das condições gerais específicas daquele projeto, tais como local de implantação, questões construtivas, público alvo e outras características pertinentes a serem consideradas para cada empreendimento específico. Tal avaliação poderia estar embarcada no próprio código e serem feitas exclusões a partir das restrições inseridas naquele código.

Novamente, tais reflexões são provocações que surgem ao se tratar da customização em massa. Ainda existem algumas lacunas a serem preenchidas, questões para as quais não existem respostas, porém faz parte do processo,

sobretudo quando se trata de um assunto novo, levantar questionamentos e encontrar oportunidades para o aprofundamento da temática.

Uma obra arquitetônica é, em sua essência, uma atividade multidisciplinar. Apesar de o projeto arquitetônico ser de responsabilidade dos arquitetos, outros atores estão envolvidos diretamente no processo, como engenheiros, mestres de obra, eletricitas e uma série de outros profissionais que devem trabalhar em sintonia para que a edificação obtenha sucesso ao fim do processo. Além dos diálogos que devem se estabelecer entre arquitetos e equipe, há um terceiro elemento fundamental para que a obra arquitetônica faça sentido, de fato: o usuário. Essa tríade, formada por arquitetos, equipe e usuários, deve estar em constante comunicação, com o objetivo principal de satisfazer as necessidades das pessoas que vão usufruir de determinado espaço.

No que tange à temática da customização em massa na Arquitetura, a principal relação a ser observada é a existente entre arquitetos e usuários. Os processos de customização em massa são focados nos consumidores, visando oferecer produtos, com uma gama de opções, que atendam às necessidades específicas por um custo semelhante ao daqueles produzidos em massa (Taube; Hirota, 2017, p. 254). Nesse sentido, os principais responsáveis por oferecer essas opções e auxiliar no processo de tomada de decisão são os arquitetos, uma vez que, se tratando de edificações, elas irão surgir dentro do processo de projeto.

Para que os objetivos da customização em massa sejam atingidos, é necessário ouvir os usuários e permitir que eles possuam uma grande interação com o projeto. Nesse sentido, a temática dos processos de projeto participativos remonta um cenário anterior ao da customização em massa em Arquitetura, havendo um grande número de pesquisas e discussões acerca do tema. Dentre os principais nomes da Arquitetura que se esforçaram para incluir os usuários nos processos de projeto nas décadas de 1960 e 1970, John Turner percebeu que a falha na comunicação e a falta dela entre arquiteto e usuário resulta em experiências desastrosas, alegando que deveria parar de trabalhar para pessoas e sim começar a trabalhar com as pessoas (Romão, 2015, p. 41).

Dentre os três tipos de participação citados por Pateman (1970, p. 68-71), pseudo, plena e parcial, na Arquitetura o ideal de se atingir é a participação parcial, sendo ela um meio termo entre os dois outros tipos (MOM, 2021a). Dessa forma, o conhecimento do arquiteto pode se tornar um atributo negativo, se atuar como uma

ferramenta de persuasão no caso da pseudoparticipação ou positivo, auxiliando as pessoas a compreenderem melhor os espaços onde elas vivem, facilitando a interpretação de suas demandas (MOM, 2021a). Nesse sentido, é necessário fornecer aos usuários conhecimentos técnicos a respeito de componentes construtivos, de processos e, principalmente, proporcionar um melhor entendimento sobre os espaços propostos em projetos com participação efetiva do usuário, evitando assim que resultem em espaços de alto custo e baixo valor de uso (MOM, 2021a).

Mais recentemente, no início da década de 2010, essa prática de projeto participativo começa a ser chamada de cocriação ou codesign (Águas, p. 61, 2012). Nesse contexto, a experiência com o produto, como emoções, valores, necessidades e sonhos, passam a ser características tão relevantes como forma, função e usabilidade no processo de projeto (Águas, p. 61, 2012), equalizando e redefinindo os papéis dentro do processo. A clássica função do projetista de ser o detentor das ideias originais e brilhantes e a função da equipe investigadora, de ser responsável pelas pesquisas de mercado junto aos utilizadores (que participavam apenas como sujeitos) passam a estar interligadas nos processos de codesign (Águas, p. 61, 2012). Dessa forma, os projetistas podem agir como investigadores junto aos usuários e estes podem tomar iniciativas na direção do desenvolvimento do conhecimento (Águas, p. 61, 2012). No entanto, é importante que a integração dessas funções seja feita da maneira correta, a fim de que as relações assimétricas existentes entre arquitetos e usuários passem a ser sim mais fluidas, porém sem excluir o conhecimento técnico que os profissionais detêm bem como o repertório dos usuários. Nesse contexto, mais do que nunca, a comunicação e a transferência de conhecimento entre arquitetos e usuários e entre usuários e arquitetos precisa ser eficiente.

Nos processos de codesign, a fim de reduzir as frustrações que podem ser causadas com a perda de tempo, material, dinheiro e o não atingimento do resultado desejado, torna-se necessário experimentar os ambientes antes de construí-los (MOM, 2021a). Tal situação pode ser mediada por interfaces, permitindo que os usuários realizem interações com o projeto de forma a intervir diretamente na tomada de decisão. As interfaces podem ser analógicas, digitais ou uma combinação de ambas, como a Interface de Espacialidade proposta pelo grupo Morar de Outras Maneiras da Universidade Federal de Minas Gerais (MOM-UFMG). Nesse caso, trata-se de um “jogo de componentes leves, modulares e encaixáveis, que pode ser montado e modificado pelo público-usuário continuamente e com grande facilidade”

(MOM, 2021b), permitindo que as pessoas experimentem o espaço em tamanho real, sendo este ilustrado por modelos físicos e digitais (MOM, 2021b).

No caso da customização em massa em Arquitetura, as interfaces digitais ganham um papel de destaque uma vez que os websites fazem parte das três características principais do projeto customizado em massa, como citado anteriormente na introdução. Tanto nos processos de projeto com customização em massa como naqueles que envolvem o projeto participativo, tecnologias como Realidade Aumentada (RA), Realidade Virtual (RV) e Realidade Mista (RM) se mostram como interfaces promissoras, por permitirem altos níveis de interatividade com o usuário. Essas tecnologias, aplicadas em uma interface adequada, podem minimizar falhas de comunicação entre arquitetos e usuários, causada, muitas vezes, pela linguagem técnica utilizada na maioria dos desenhos de representação arquitetônica, o que dificulta a inserção do usuário nos processos de projeto participativos, como citado na primeira seção.

Plantas, fachadas, seções, maquetes, fotografias e a cinematografia são os principais meios de representação do espaço, todos contribuindo de alguma forma para tal, porém deixando eventuais lacunas (Zevi, 2009, p. 51). Ainda que a cinematografia possa ser a forma mais dinâmica de se representar um espaço, opondo-se à estaticidade das fotografias e perspectivas, ainda consistem em experiências diferentes o ato de assistir a um filme e o de atuar no mesmo, por exemplo, sendo a vivência física do espaço a única maneira de nos fazer compreendê-lo em sua totalidade (Zevi, 2009, p. 51). No entanto, as antecipações e representações são necessárias na Arquitetura, podendo a RV, por exemplo, suprir em parte a vivência física de um espaço ainda não construído, já que suas características de imersão e interatividade permitem uma vivência virtual desse. Em cenários de RV é possível percorrer o espaço livremente, sem a predeterminação de um percurso imposto por um vídeo, além de ser possível alterações instantâneas no ambiente para a visualização de outras opções de configuração do espaço. No caso da RV imersiva, os head-mounted displays (HMDs), fones de ouvido e sensores táteis são capazes de isolar o usuário dentro do mundo virtual, permitindo um alto nível de imersão no espaço.

Em algumas pesquisas, onde a tecnologia de RV é utilizada com o intuito de tornar a leitura do projeto mais fácil por leigos em projetos de codesign ou participativos, os resultados são favoráveis no que tange seu uso. Tanto aquelas que

utilizam equipamentos e ferramentas mais simples, como no experimento proposto por Souza, Imai e Azuma (2018), como nas que fazem uso de equipamentos mais sofisticados, como na pesquisa de Loyola et. al. (2019) é possível concluir que os usuários conseguem uma melhor compreensão das características do espaço com as experiências em RV. No entanto, é possível observar que algumas limitações dos equipamentos utilizados influenciam diretamente na percepção dos usuários, como no primeiro caso citado, onde a imersão através de sequências de imagens em 360° prejudicou o entendimento da residência como um todo, uma vez que não era possível compreender as relações entre os cômodos (questão que acaba sendo bem resolvida pelas plantas-baixas, por exemplo). Um outro ponto a ser observado é a grande ocorrência de pesquisas que investigam processos de codesign e recursos de interação como a RV explorando-a apenas nas fases iniciais do processo de projeto ou apenas como forma de validação da proposta já fechada pela equipe de projeto (caindo na situação não desejável da pseudoparticipação).

Nos processos de customização em massa em Arquitetura, a utilização do codesign é intrínseca, exigindo um alto grau de interação e colaboração do usuário em diferentes etapas. Nesse sentido, quando é dado ao usuário um alto grau de liberdade (como as variações topológicas e dimensionais), é necessário que a interface utilizada seja capaz de informá-lo sobre as decisões que ele está tomando, sendo uma forma eficaz de comunicar a ele as mais diversas variáveis complexas do projeto, mostrando o impacto que elas terão no resultado final (Kolarevic; Duarte, 2019, p. 9). As interfaces de apoio aos processos de projeto customizáveis precisam fornecer o suporte e a segurança necessárias ao usuário leigo, funcionando como um “designer digital”, tendo a capacidade de dialogar, ajudar a entender as necessidades, aconselhar e oferecer soluções (Kolarevic; Duarte, 2018, p. 9). Nesse sentido, o arquiteto precisa estar por trás do desenvolvimento dessa interface, para que ela cumpra bem o seu papel, não deixando com que um projeto customizado em massa perca em qualidade para aqueles produzidos em larga escala ou de forma individualizada.

Existem algumas ferramentas que buscam otimizar o processo de tomada de decisão, como o caso da ARCHITEChTURES, desenvolvida pelo Smartscapes Studio, na Espanha. Trata-se de uma ferramenta web de projeto assistido por Inteligência Artificial (IA), voltada para o setor residencial, prometendo multiplicar a eficiência do processo de projeto e reduzindo seu tempo de meses em minutos

(ARCHITECTURES, 2021). Através de um input fornecido pelo projetista na forma de um desenho simples de AutoCAD ou do desenho das linhas em planta na própria plataforma, é possível modificar vários parâmetros através de sliders. Pode-se entrar com as dimensões desejadas para o terreno, bem como para o tamanho geral do edifício. A partir daí, adiciona-se a quantidade de unidades, dormitórios por unidade, varandas, vagas de estacionamento, áreas comuns, piscina, etc. À medida que os parâmetros vão sendo modificados, a ferramenta altera a planta baixa e informa se as medidas estão dentro do mínimo recomendado, sendo possível editar manualmente as dimensões de cada cômodo gerado. Apesar de possuir uma curva de aprendizagem relativamente pequena, trata-se de uma ferramenta voltada para arquitetos e construtores, uma vez que aborda o projeto de edifícios residenciais multifamiliares como um todo e exige certo conhecimento técnico prévio.

Assim como a ferramenta ARCHITECTURES, outra plataforma que trabalha com arquivos paramétricos é o *ShapeDiver* (Shapediver, 2021). Nesse caso, a ferramenta permite que modelos gerados através dos softwares *Rhinceros*® e *Grasshopper*® sejam compartilhados online através de um link ou incorporados diretamente ao site que realiza a venda de determinado produto. Após realizar o upload do arquivo no site do *ShapeDiver*, é possível personalizar as configurações de exibição, ajustando parâmetros como iluminação e propriedades de câmera, uma vez que o modelo possui renderização ao ser manipulado pelo usuário final no site no qual estiver disponível. Pode-se também gerenciar a ordem e a visibilidade dos parâmetros que serão exibidos através de sliders para o usuário final. Dentre sites que já utilizam a plataforma para vender seus produtos customizados, a maioria consiste em empresas do setor moveleiro, indo de configurações mais simples e intuitivas como alterar dimensões e cores de uma mesa até um nível mais profundo de customização, como a criação de uma cozinha planejada, onde é necessário entrar com as medidas e formato do cômodo, utilizando-se de pequenos vídeos explicativos para que o usuário consiga interagir de forma adequada com o site.

Além da necessidade de a interface funcionar bem para os objetivos do processo de customização em massa, questões como interação e sua qualidade precisam ser observadas. Para isso, é possível encontrar formas de avaliação e validação em disciplinas como o Design, o Design de Interfaces/Interação e a própria Computação. Assim como nos processos de customização em massa, é imprescindível entender as necessidades do usuário. Para que ele consiga fazer bom

uso da interface, ela também precisa ser planejada de acordo com quem vai utilizá-la. É necessário compreender “o quê”, “por que” e “como”, na realização de uma interface antes de se redigir qualquer código (Rogers; Sharp; Preece, 2013, p.57). Além dessas questões, após o desenvolvimento da interface, ela precisa ser testada e validada junto aos usuários, utilizando-se de técnicas de análise que medem os níveis de interação e de usabilidade, como o *user experience* ou as 10 heurísticas propostas por Nielsen (2001) para avaliação de critérios de usabilidade.

Com base nas questões levantadas, é possível perceber que existe uma diferença entre participação no projeto e apenas sua validação por parte do usuário, o que caracteriza a pseudoparticipação. É necessário que ele esteja presente durante o processo de projeto como um todo, opinando e fazendo escolhas que, por vezes, devem ser acompanhadas da orientação profissional. Nos processos que envolvem a customização em massa, questiona-se em quais etapas é possível que o usuário intervenha de maneira direta, sendo uma lacuna para estudos futuros. Um outro ponto importante a ser avaliado posteriormente é quanto ao conjunto de ferramentas a ser utilizado nos processos de projetos customizáveis. Indo além dos websites, aplicativos que combinem RA e RV podem ser uma ferramenta de visualização e interação poderosa com o projeto customizado em massa.

Existem diversos fatores que influenciam a produção na IAEC oriundos de suas próprias especificidades, reflexos de questões econômicas e políticas externas. Dentre essas especificidades, destacam-se duas: (1) a fragmentação da cadeia de produção que é compartilhada por múltiplos agentes e renovada a cada novo empreendimento; (2) o atraso tecnológico em relação às outras indústrias. Tais características trazem consequências como, dificuldade no gerenciamento da cadeia de suprimentos, controle de cronograma e orçamento e manutenção da qualidade (Smith, 2019; Larsen, *et al.*, 2019; Avalone; Fettermann, 2019; Paoletti, 2018; Piroozfar; Larsen, 2009).

Segundo Segerstedt (2010), a indústria AEC, é marcada por forte volatilidade e dependência de questões políticas e econômicas externas. Em épocas de crise os profissionais da construção são um dos grupos que mais sofrem impactos com o desemprego. Da mesma forma, em época de alta demanda, a oferta de emprego para profissionais com pouca qualificação técnica é maior do que em outras indústrias. Nesse sentido, a fragmentação da indústria em pequenas empresas é percebida como uma forma de proteção (Segerstedt; Olofsson, 2010). No Brasil, essa fragmentação

pode ser identificada a partir dos dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2016), que demonstram que 82% das 215.000 empresas de engenharia operam com 10 funcionários ou menos.

Tal volatilidade também inibe investimentos em linhas de produção industrializadas, pois em tempos de crise, estas oferecem alto risco para os empreendimentos e em tempos de alta demanda geram dependência da contratação de mão-de-obra qualificada. Tais fatos fundamentam a afirmação de que a IAEC é menos aberta a inovações do que outras indústrias (Avalone; Fettermann, 2019; Larsen *et al.*, 2019; SMITH, 2019). De fato, percebe-se que o conjunto das características acima fazem com que a construção civil seja altamente dependente de processos artesanais, comparado a outras indústrias.

Outra característica importante da produção na IAEC são as etapas operacionais das edificações. Embora possua as mesmas etapas que outros produtos (projeto – fabricação – montagem) a etapa final ocorre totalmente ou parcialmente no sítio de entrega e não em ambiente controlado para posterior entrega ao usuário final (Piroozfar; Larsen, 2009). Essa logística está relacionada à escala do produto e sua consequente dificuldade de mobilidade junto às especificidades de cada local, que impõem desafios logísticos específicos para cada novo empreendimento (Smith, 2019; Larsen *et al.*, 2019).

Conforme é possível observar, a fragmentação e constante alternância dos agentes da IAEC é um dos principais problemas para a CM, uma vez que inibe o melhoramento contínuo dos processos e a inovação tecnológica da indústria. Por isso, Segerstedt (2010), defende um modelo de comunicação centralizado dos agentes envolvidos nos empreendimentos a partir de tecnologias da informação mais avançadas. Nesse sentido, o *Building Information Modeling* (BIM) permite a comunicação em tempo real das ações provenientes das diferentes disciplinas, descentralizando os processos decisórios (Andrade; Ruschel, 2011). Além disso, é necessário que os empreendimentos adotem modelos de negócio com contratos mais transparentes, que fortaleçam o comprometimento dos contratados com a produtividade, a confiança, colaboração e comunicação entre agentes (Segerstedt; Olofsson, 2010).

2.3.1. Pré-fabricação da construção

É importante ressaltar que a pré-fabricação e seu uso na construção civil não é um conceito novo e já vem sendo apropriado na Arquitetura a mais de 150 anos (Smith, 2019; Larsen *et al.*, 2019). No Movimento Modernista, arquitetos como Le Corbusier, Frank Lloyd Wright, Gropius e outros nomes expressivos, já idealizavam o uso da pré-fabricação para a entrega de habitações. No entanto, a CM surge como uma estratégia dentro de um contexto digitalizado, onde as tecnologias computacionais são capazes de gerar comunicação sem precedentes entre usuário, projeto e fábrica.

A pré-fabricação da construção possui notórias vantagens para a produção e controle da cadeia de suprimento na IAEC. Ao levar a maior parte da produção para o ambiente controlado dentro da fábrica, os efeitos adversos da construção *in loco* são amenizados e o gerenciamento das operações e da cadeia de suprimentos é facilitado. A partir de componentes padronizados, diferentes arranjos podem ser realizados a fim de oferecer diferentes possibilidades conforme seu posicionamento na edificação como um todo. Também, a centralização da produção permite amenizar os efeitos de mutação de demanda de mão-de-obra (Larsen *et al.*, 2019; Smith, 2019).

Smith (2019) ressalta que, embora as tecnologias digitais permitam essa expressiva velocidade na relação entre usuário, projeto e produção, existe um choque entre arquitetos e fabricantes no tratamento em relação à comunicação com o usuário. Ainda segundo o mesmo autor, na Arquitetura a CM é abordada como serviço, enquanto para fabricantes é tratada exclusivamente como produção. A diferença é que nos serviços, a interação com o usuário é por natureza necessária para que a entrega seja bem sucedida, e por isso valorizada para o aumento da qualidade. Na produção, a interação com o usuário é inversamente proporcional à produtividade, e por isso evitada.

Logo, de acordo com Smith (2019), é importante que esse choque seja percebido e compreendido para que juntos, arquitetos e fabricantes, possam compreender e avaliar quais *inputs* do usuário final devem ser considerados e quais devem ser descartados para gerar uma edificação customizada em massa viável economicamente e que gere valor real, já que inevitavelmente, o aumento da participação do usuário diminui a produtividade. Feita essa avaliação é possível definir uma linguagem de projeto que permita a inserção dos *inputs* do usuário final no ponto

correto da cadeia de produção. A este ponto de inserção do usuário é dado o nome de ponto de dissociação (*decoupling point*).

Para a adoção de processos de produção pré-fabricados, Smith (2019) ressalta a importante colaboração entre arquitetos e fabricantes em prol adoção de estratégias de projeto voltadas para a manufatura e montagem (DFMA, do inglês *Design for Manufacturing and Assembly*). Nessa estratégia o desenvolvimento do projeto deve prezar pela modularidade das soluções e pela redução do número de partes que compõem a edificação, facilitando a respostas aos *inputs* do usuário final após a etapa de pré-montagem e antes da montagem final *in situ*.

2.3.2. Fabricação digital e Indústria 4.0

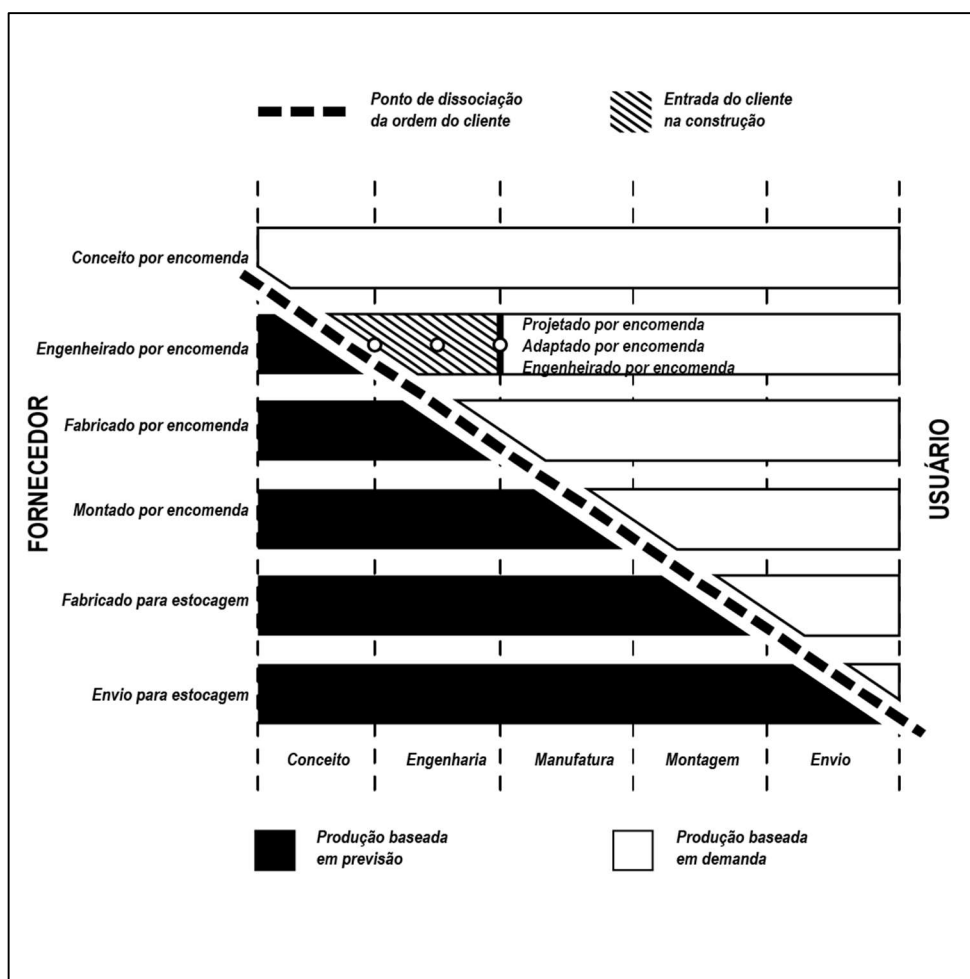


Figura 1: Ponto de dissociação - produtividade aumenta com menos inputs do usuário. Traduzido pelos autores. Fonte: (Smith, 2019).

A fabricação digital (FD) consiste em um processo de conversão da informação de um modelo digital em dados de controle numérico, para produção de um modelo físico (Kolarevic, 2003). A partir da interface das tecnologias de projeto auxiliado por computador (CAD) e manufatura assistida por computador (CAM), permite-se o estreitamento do fluxo de informação entre projeto e produção. A possibilidade dessa integração consistiu em um importante passo rumo a automação dos processos de produção, resultando na possibilidade de produção de componentes únicos sem aumento de custo e tempo. No entanto, conforme é possível observar, a definição de FD é formada a partir de seu processo e não do resultado. Isso quer dizer que a fabricação de produtos padronizados utilizando maquinário digital não descaracteriza o processo de FD. No entanto, esclarece-se que o presente trabalho trata a FD exclusivamente para a produção automatizada de componentes únicos.

Dentre as diferentes classes de processos de FD (subtrativo, aditivo e formativo) a manufatura aditiva (MA) é aquele que, segundo Paoletti (2018), seria o principal facilitador da CM na AEC. Isso porque esse processo permite a produção de componentes únicos tridimensionais, com baixa interferência humana, que seriam muito difíceis de serem produzidos por vias tradicionais. Ressalta-se que a MA oferece o potencial de alcance de viabilidade econômica da produção em níveis maiores que os modelos de produção fordista e da produção enxuta foram capazes, direcionado a um nível de inovação na produção sem precedentes (Paoletti, 2018).

Dito isso, existem duas formas de abordagem do uso da manufatura aditiva na Arquitetura: (1) a produção de componentes construtivos menores para serem montados e transformados em estruturas maiores e (2) a produção de edificações inteiras in situ (Naboni; Paoletti, 2015). A manufatura aditiva de estruturas inteiras possui o potencial de oferecer imprescindíveis níveis de liberdade para arquitetos e outros projetistas a partir da construção de geometrias complexas monolíticas, sem a necessidade de mão-de-obra especializada.

Porém, existem limitações consideráveis a serem solucionadas, antes que essa venha a ser uma alternativa viável. Entre elas, podem ser citados os desafios relacionados ao desempenho mecânico, estrutural, térmico, lumínico e etc. Ademais, entre estes desafios, uma das principais barreiras reside no tamanho do maquinário necessário, comparado com a escala das edificações (Paoletti; Ceccon, 2018). Embora avanços significativos no desenvolvimento desses maquinários tenham ocorrido, as promissoras vantagens da manufatura aditiva de edificações inteiras

ainda são vistas de uma perspectiva de longo prazo. Nesse sentido, a manufatura aditiva de componentes construtivos na Arquitetura encontra-se em um estado mais avançado. Por isso, Paoletti e Ceccon (2018), apontam que a manufatura aditiva de componentes construtivos menores que constituem partes da edificação como uma estratégia mais adequada para superar as limitações atuais da produção de edifícios monolíticos. Essa abordagem, segundo Paoletti (2018), atualmente vem sendo amadurecida a partir da sua integração com outros tipos de produção (tradicional, pré-fabricação), de forma cada vez mais fluida, configurando um sistema de produção híbrido, eficiente e flexível ao mesmo tempo.

Finalmente, além do desenvolvimento da digitalização da manufatura, avanços em tecnologias de computação capazes de proporcionar análise avançada de uma quantidade de dados sem precedentes, abre um novo horizonte de produção utilizando uma quantidade expressiva de dados. A este fenômeno é dado o nome de indústria 4.0 (I4.0) (Paoletti, 2018). Nesse contexto, novos modos de projetar, associado às tecnologias como a fabricação digital, direcionam para uma revolução na manufatura em rumo a possibilidade de customização sem precedentes, desde os primeiros processos operacionais, extrapolando os limites da customização à nível de projeto para níveis de materiais e maquinário (Paoletti, 2018).

No Brasil, a literatura sobre o assunto ainda é escassa com foco maior nos processos de fabricação para a customização do produto final. Sobre aplicações práticas, existe ainda uma distância considerável para que o Brasil atinja patamares da I4.0 presentes em países desenvolvidos, já que a formação universitária é distante da realidade empresarial. Adiciona-se poucos investimentos públicos em tecnologias de ponta. Ainda assim, atualmente existe um crescente interesse sobre o assunto por parte dos pesquisadores (Miyasaka; Fabricio; Paoletti, 2018).

Como foi possível observar, existem especificidades da IAEC que devem ser consideradas na implementação da CM como estratégia. Por isso, deve haver cautela ao empreender conceitos de outras indústrias na construção civil, devido a todas as suas características próprias, e considerar o desenvolvimento de abordagens novas que cubram as complexidades próprias das edificações enquanto produto.

Percebe-se que a CM, embora inerente a um contexto digitalizado, não depende exclusivamente de processos de produção digitalizados. Dada a correta abordagem estratégica e comunicação entre projetistas e fabricantes, a pré-fabricação dentro de um contexto logístico responsivo o suficiente, é capaz de possibilitar a CM

na Arquitetura. Todavia, a produção tradicional a partir de técnicas artesanais, não configura um horizonte possível para a CM, exceto em casos específicos, a partir da montagem automatizada utilizando tecnologia robótica. No entanto, esta é uma alternativa fora de um alcance de curto a médio prazo.

Conforme visto, embora não necessariamente dependente da FD, é nela que reside o maior potencial para a CM na IAEC, pois possibilita a introdução dos inputs do usuário no início da cadeia de produção, sem acréscimos de custo e tempo. Nesse grupo, as qualidades da MA apresentam maior potencial para CM. O constante avanço dessas tecnologias, em conjunto com avanços na comunicação de dados traçam o caminho onde a CM no contexto da I4.0 poderá finalmente atingir seu potencial na IAEC já vislumbrado a mais de 30 anos.

No que diz respeito à relação entre arquitetos e usuários, o uso de uma interface adequada se apresenta como a mediadora do diálogo. Essa ferramenta, ou conjunto de ferramentas, deve proporcionar liberdade de criação para o usuário, de maneira interativa, porém com a atuação do profissional por trás da interface. Dessa forma, ela serve também como uma ferramenta de educação, mostrando ao usuário o que é possível de ser feito juntamente com suas consequências. Além disso, a interface precisa fazer com o que o usuário visualize sua criação de forma clara, visando minimizar frustrações quando o espaço for construído. Dessa forma, indo além dos websites, aplicativos que combinem RA e RV podem ser uma ferramenta de visualização e interação poderosa para o projeto customizado em massa.

Outro ponto a ser discutido, nesse sentido, é com relação à diferença existente entre participação no projeto e apenas sua validação por parte do usuário, o que caracteriza a pseudoparticipação. Para que a participação ocorra, tornando o espaço customizado, de fato, questiona-se em quais etapas é possível que o usuário intervenha de maneira direta, sendo uma lacuna para estudos futuros, bem como através de quais interfaces as eventuais coletas de dados poderiam ser feitas, qual a interface mais adequada para cada etapa e qual forneceria mais suporte no processo de tomada de decisão.

3. METODOLOGIA

Conforme explicado em nosso primeiro capítulo, onde apresentamos a metodologia adotada e a estrutura da dissertação, para elaborar nosso algoritmo

levaríamos em conta as ferramentas e recursos voltadas para geração automatizada de soluções projetuais ou de auxílios de projeto já disponíveis atualmente. Para organizar essa análise, levamos em conta ferramentas computacionais destinadas a duas das principais questões referentes às etapas de projeto de edifícios verticais: os estudos de viabilidade e a variabilidade vertical.

O conjunto de estudos que engloba análise de viabilidade técnica, viabilidade financeira, análise do terreno, análise da legislação urbanística, análise de impacto e de volumetria, dentre outros, é geralmente definido apenas como “estudo de viabilidade”, é uma etapa preliminar de projeto que leva em conta os códigos de obras, planos diretores, ou outras diretrizes ou legislações urbanísticas para definir gabarito, afastamentos, taxas de ocupação, coeficientes, etc. Esse estudo leva em conta a área construída pretendida para avaliar a viabilidade do projeto de acordo com esses fatores de legislação, e é uma etapa essencial para que se dê início a qualquer projeto arquitetônico propriamente dito.

Quanto à “variabilidade vertical” é a forma como denominamos nossa intenção de fugir da solução tipológica na edificação verticalizada. Muitos projetos de edifícios recorrem às chamadas “plantas-tipo” para resolver suas unidades, uma vez que se segue geralmente o raciocínio de “o usuário se adapta à planta”. Com nossa intenção de produzir soluções mais direcionadas a diferentes perfis – soluções “customizadas”, por falta de terminologia mais apropriada – faz sentido buscarmos ferramentas que pretensamente não se utilizem desse tipo de solução, como o Open Building possibilita e vimos em nossa discussão no segundo capítulo. Com isso podemos pensar em soluções em que “a planta se adapte ao usuário”.

3.1. Ferramentas de estudo de viabilidade técnica

Os softwares de estudo de viabilidade têm se tornado populares entre escritórios de Arquitetura, visto que todo o processo de analisar a viabilidade de um empreendimento passa por uma série de parâmetros muito bem definidos: as legislações urbanas e planos diretores de municípios. Ou seja, uma série de dados bastante objetivos, que podem ser aplicados e definidos para cada situação, de acordo com a natureza do projeto: qual o zoneamento? Qual a taxa de ocupação permitida? Qual o coeficiente de aproveitamento? Quais os afastamentos e quais os gabaritos máximos permitidos, e como eles se relacionam entre si, visto que é comum

que as diretrizes exijam afastamentos maiores entre os limites da edificação e os limites do lote à medida que se aumentam os gabaritos. Com base em tudo isso, escritórios e empreiteiras têm buscado maneiras de sistematizar esses processos através de ferramentas computacionais, com interfaces intuitivas, de forma a simplificar o processo de avaliar a viabilidade de novos empreendimentos e fornecerem respostas rápidas a seus clientes.

Com o objetivo de analisar algumas ferramentas já existentes dessa natureza, realizamos uma busca online pelas ferramentas que estavam em evidência, principalmente no contexto de escritórios de Arquitetura ou empresas do ramo da AEC, que compartilham suas experiências em redes sociais como o LinkedIn, uma rede voltada para compartilhamento de experiências profissionais e networking.

A seleção se deu baseado em quão avançada já se encontrava a ferramenta no momento de nossa busca, e no tipo de outputs ela fornecia para o usuário. Analisamos qual a base sobre a qual funcionava a ferramenta: se programação textual, recursos de Inteligência Artificial (IA) ou processamento em nuvem; e qual a característica que a distinguia das demais. Isso nos trouxe às três ferramentas a seguir:

3.1.1. Place

A empresa brasileira OSPA, que iniciou como um escritório de Arquitetura em Porto Alegre, tornou-se uma referência de aplicação de tecnologia em seus projetos, e mais tarde enveredou pelos rumos do desenvolvimento de software, ampliando o escopo do grupo. O sistema Place, desenvolvido por eles, trata-se de uma plataforma online para estudos de viabilidade, trazendo estimativas orçamentárias e dados sobre o terreno.

A ferramenta funciona com diferentes planos de pagamento, ancorando-se em torno de bancos de dados com mapas geolocalizados das cidades, dados de zoneamento, loteamento, aplicação de inteligência artificial e visualização em 2D e 3D, para gerar dados de taxa de ocupação, área construída, análises de terreno e estimativas de custo de aquisição do terreno e construção do projeto além de possibilidade da visualização da volumetria, tudo baseado nas legislações urbanas específicas do local e possibilitando resultados em tempo real. Ela também

proporciona uma interface amigável até para usuários mais leigos, apesar de o público-alvo ser o corpo técnico especializado.

A interface é acessada por navegador de internet através do endereço www.app.ospa.place, onde gratuitamente e sem cadastro é possível selecionar e estudar um lote, e ver os dados básicos de legislação referentes. O restante dos dados fica restrito aos assinantes da plataforma, assim como o recurso de análise volumétrica e o estudo de viabilidade completo.

Como exemplo de teste, selecionamos o lote 2302 na Rua da Consolação, em São Paulo, demonstrado na figura 2:

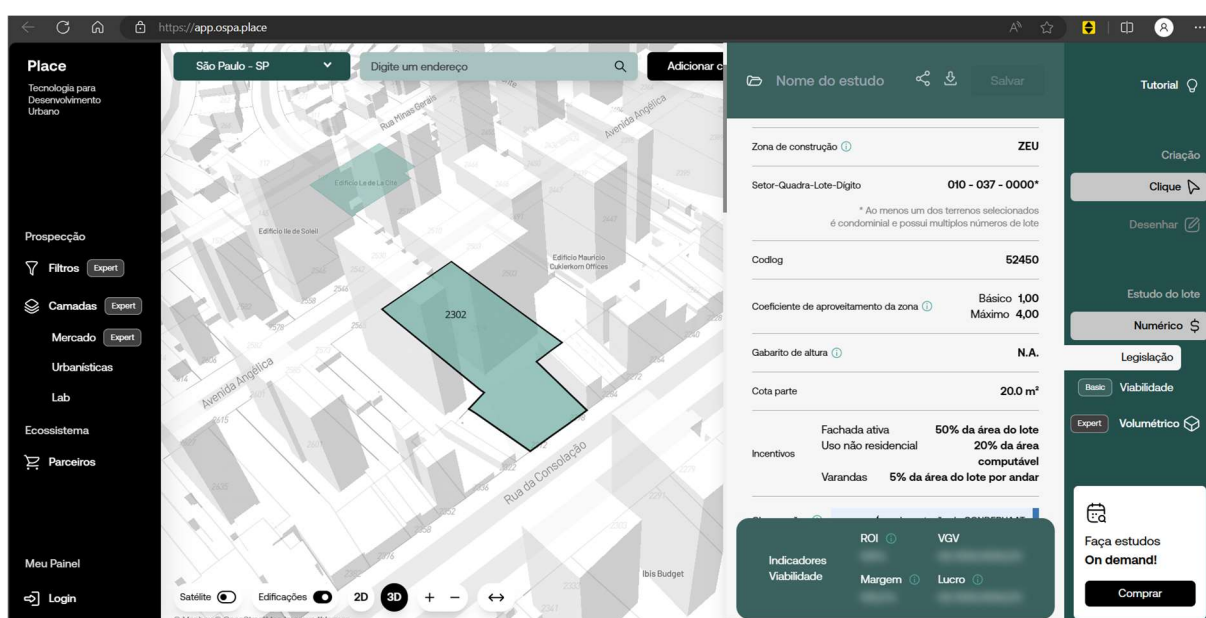


Figura 2: Interface da plataforma Place, com seleção do lote de exemplo. Fonte: captura de tela do autor.

Através do período de teste gratuito de quatro dias disponibilizado pelo Place, pudemos visualizar a análise completa da ferramenta, onde o destaque fica para o envelope de Restrições Volumétricas, que representa os limites permitidos pela legislação quanto aos recuos a partir da fachada e limites do terreno, que são proporcionais ao gabarito da edificação. Podemos ver o volume das restrições, que delimita o espaço dentro do qual o edifício poderá ser situado (figura 3) e o volume do potencial volumétrico estimado (figura 4), que é o máximo utilizável permitido àquele terreno, bem como podemos delimitar uma altura máxima, como 50 metros, por exemplo, e analisar também os dados da potencial construção baseados nisso (figura 5). Selecionando “Viabilidade” no menu à direita, podemos ver as estimativas de custo

do projeto, incluindo compra do terreno e execução da obra seguindo os parâmetros fornecidos (figura 6).

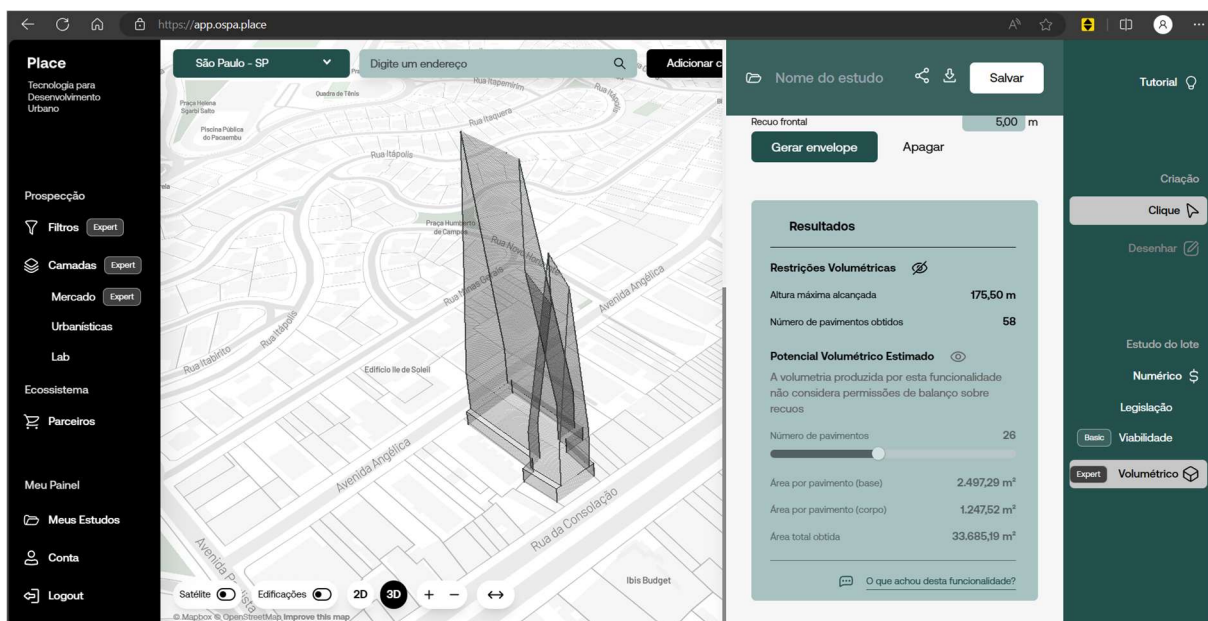


Figura 3: restrições volumétricas do terreno de exemplo na plataforma Place. Fonte: captura de tela do autor

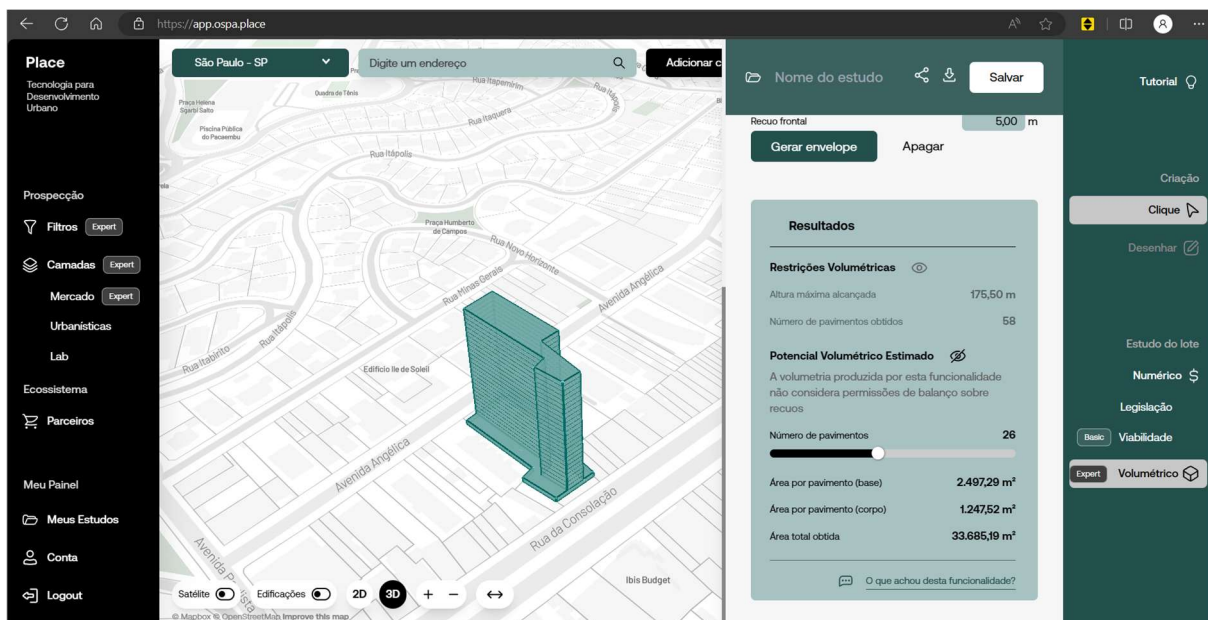


Figura 4: Visualização do potencial volumétrico estimado, na interface da plataforma Place. Fonte: captura de tela do autor

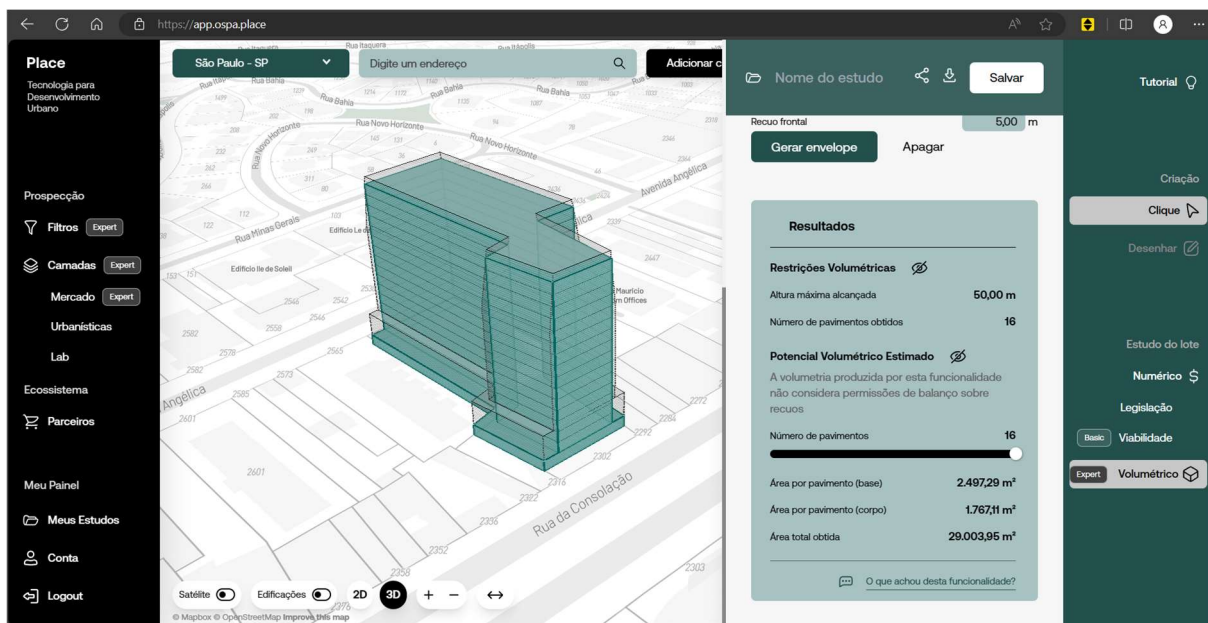


Figura 5: volumetria estimada de um edifício de até 50m de altura, respeitando as diretrizes urbanas da cidade de São Paulo. Fonte: captura de tela do autor

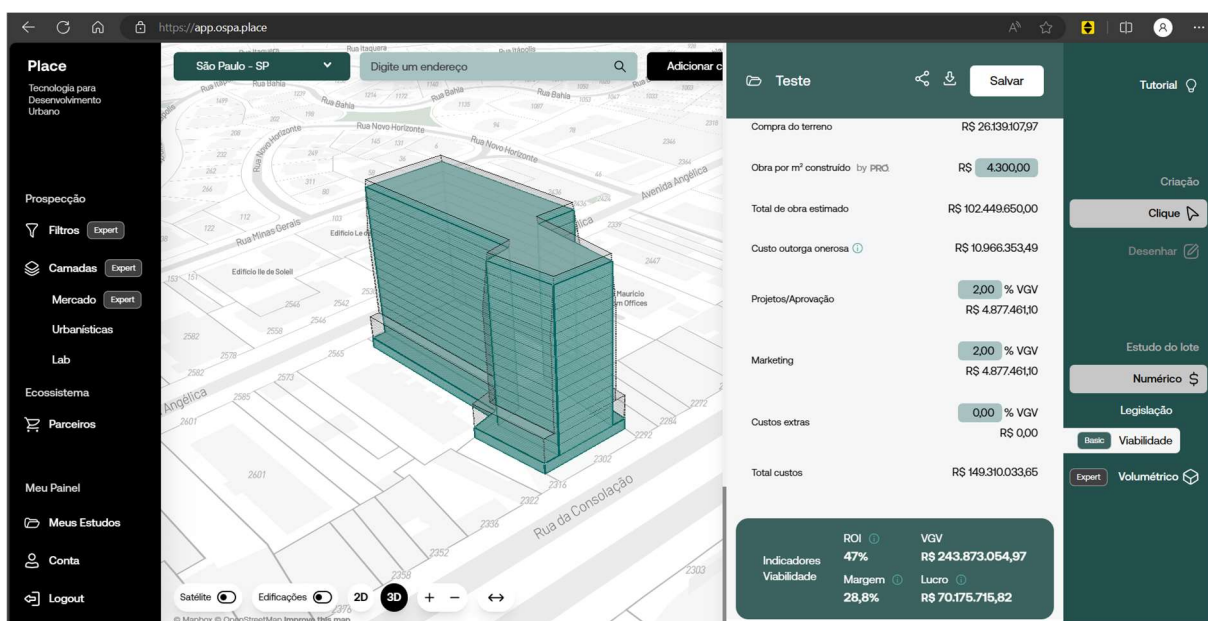


Figura 6: demonstração das estimativas financeiras geradas pela plataforma Place, baseado no exemplo da Figura 5. Fonte: captura de tela do autor

Um outro recurso que vale mencionar é o de que a plataforma permite fazer o download de todos os dados gerados, incluindo as visualizações 2D e 3D, em formato de PDF, já formatado para apresentação, o que realça a amigabilidade da ferramenta.

Apesar de abrangente, no momento de outubro de 2023 a ferramenta conta com apenas quatro cidades – São Paulo - SP, Blumenau - SC, Porto Alegre - RS e São Leopoldo - RS – mesmo com a empresa já tendo declarado intenções de seguir ampliando a lista de cidades disponíveis no futuro.

3.1.2. TestFit

O TestFit é um software desenvolvido pela empresa americana TestFit Inc. e é voltado para estudos de viabilidade e mercado imobiliário. Sua utilização está restrita a assinatura mensal e disponibiliza um teste gratuito de 14 dias e, até o momento de outubro de 2023, possui dados referentes apenas a algumas cidades (não listadas) nos Estados Unidos. Ele automatiza o processo de geração de estacionamentos e de blocos residenciais, através de recursos de inteligência artificial e bancos de dados com informações geolocalizadas e de diretrizes urbanas.

Em tudo, a ferramenta é bastante semelhante ao Place, mas algumas diferenças se fazem notar, além da diferença de plataforma e interface: o TestFit permite a geração de pré-visualizações de volumetrias, além de oferecer diversas predefinições para diversas tipologias, como estacionamentos, blocos de alta ou baixa densidade, com núcleo central, dentre outras (figura 7), e essas volumetrias contam com subdivisões em unidades, como apartamentos ou salas comerciais, tanto em planta (figura 8) como em 3D (figura 9).

A parte inferior da interface possui diversas abas, onde mostra os dados gerais da distribuição dos blocos, aproveitamento, eficiência, etc. (figuras 8 e 9) ou dados financeiros (figura 10), além de outras funcionalidades extras, como renderização e dados de energia, através de parcerias com outras ferramentas que fornecem esses serviços.

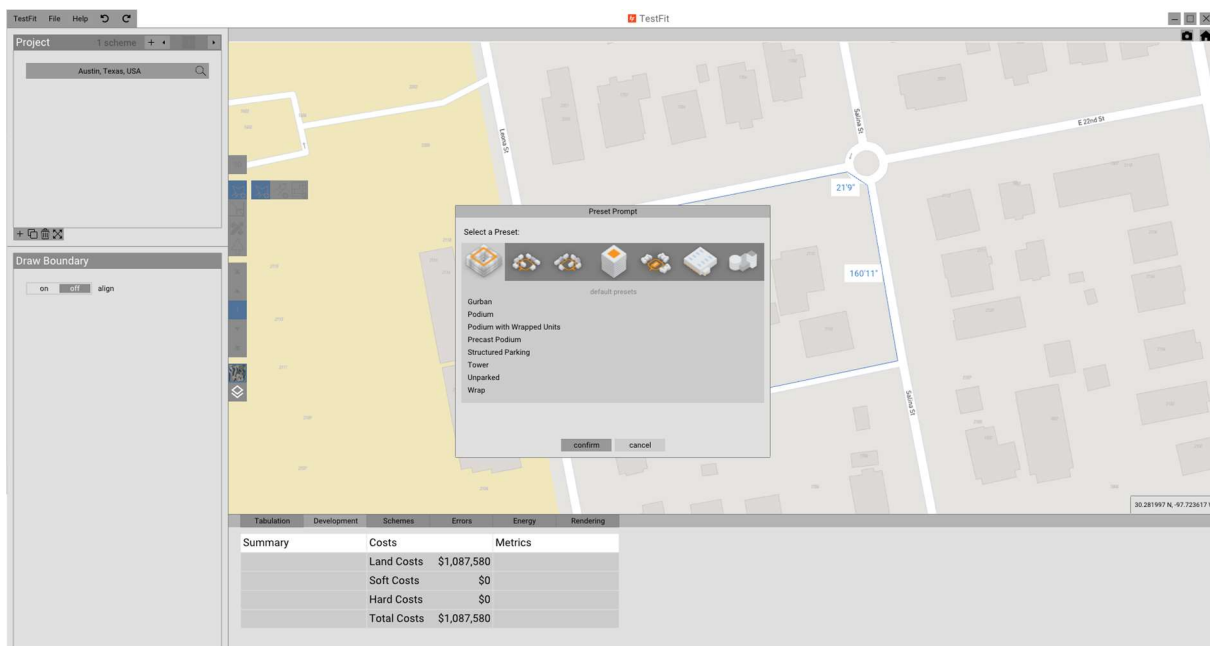


Figura 7: seleção das predefinições disponíveis no software TestFit. Fonte: captura de tela do autor

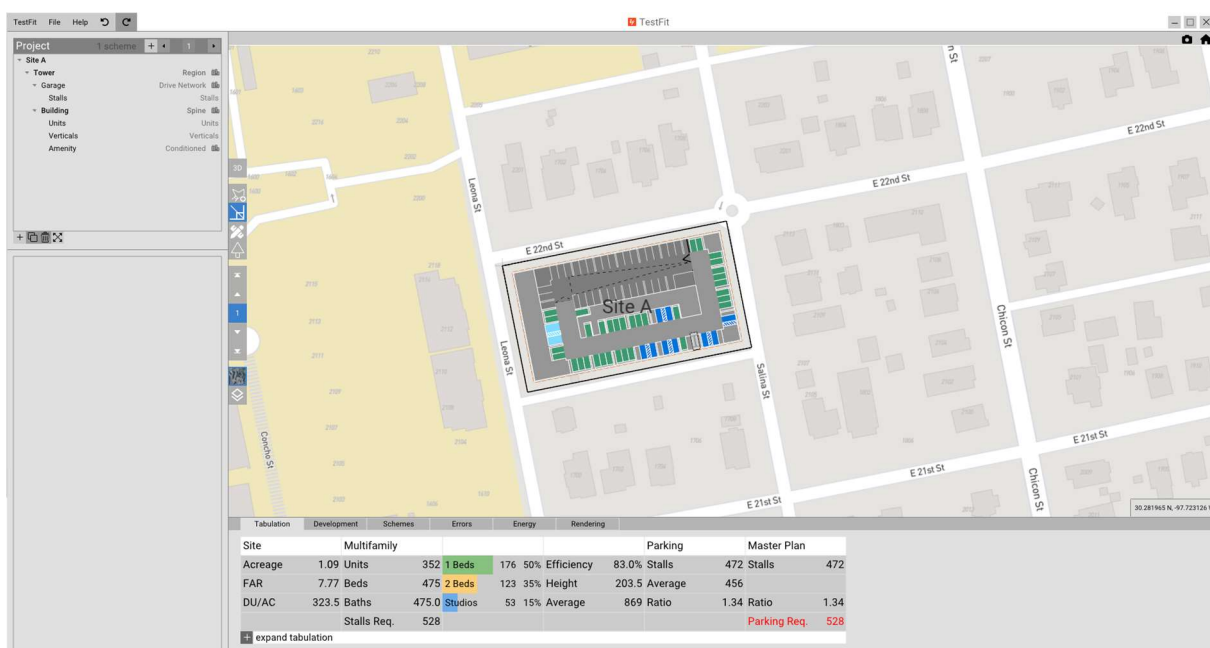


Figura 8: Visualização em 2D da implantação conforme proposta pelo software TestFit. Fonte: captura de tela do autor

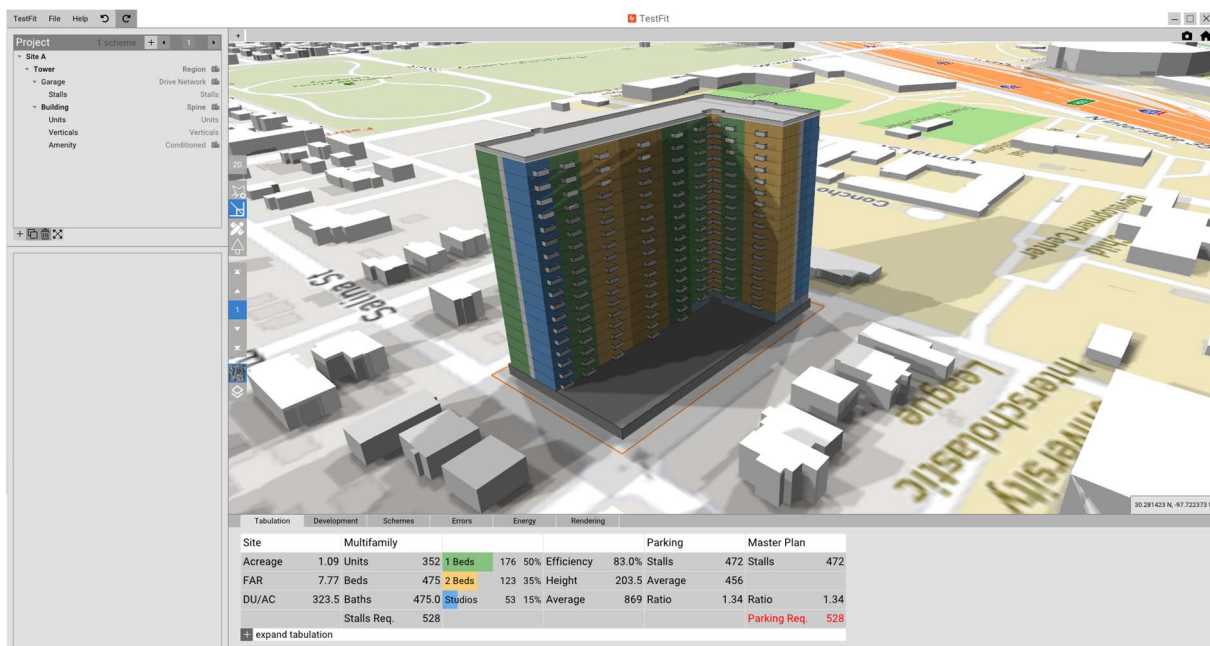


Figura 9: Visualização em 3D na interface do software TestFit. Fonte: captura de tela do autor

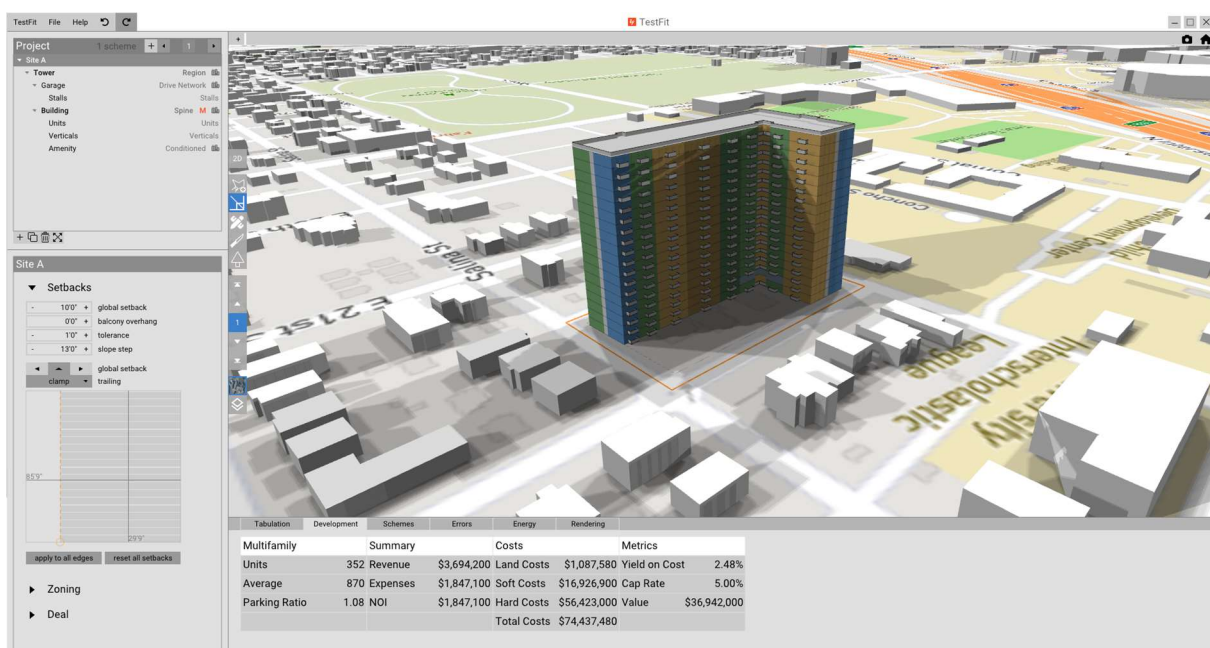


Figura 10: exibição dos dados financeiros contidos na aba *Development*, na parte inferior da interface. Fonte: captura de tela do autor

Ao analisarmos as distribuições das unidades ao longo da volumetria proposta pelo software, percebemos que ele recorre à solução tipológica, sendo todas as plantas idênticas entre si. Existe variabilidade das soluções para as unidades, conforme é possível perceber na figura 8, mas essa variabilidade é replicada

verticalmente (figuras 9 e 10), sendo assim uma solução mais convencional de projeto de edifício, através das plantas-tipo.

3.1.3. Parametric Solutions

O **Parametric Solutions** é um software desenvolvido pela empresa sueca homônima que possibilita estudos de viabilidade e soluções internas de edificações. O processamento em nuvem e baseado em design generativo proporciona a análise de diversas possibilidades de solução projetual, mas também se apoia em soluções de planta-tipo, nos moldes das soluções vistas com o TestFit.

Infelizmente, a ferramenta ainda está em fase de Beta – ou seja, disponível apenas para pessoas selecionadas, que testam, avaliam e fornecem feedbacks para os desenvolvedores – e, apesar de termos solicitado participação, não nos foi concedido acesso, até o momento.

Desta forma, trazemos a análise nos baseando nos materiais de divulgação disponíveis online, por se tratar de uma ferramenta interessante, que traz pelo menos um recurso a mais que as duas outras que vimos até agora: a possibilidade de estudo baseada em design generativo (figura 11). Ou seja, a partir de certos parâmetros estabelecidos, podemos visualizar como as diferentes soluções abordam as necessidades do projeto e como esses parâmetros são priorizados em detrimento dos demais, o que permite selecionar um cenário que seja mais otimizado que outro, levando em conta os critérios estabelecidos (figuras 11 e 12).

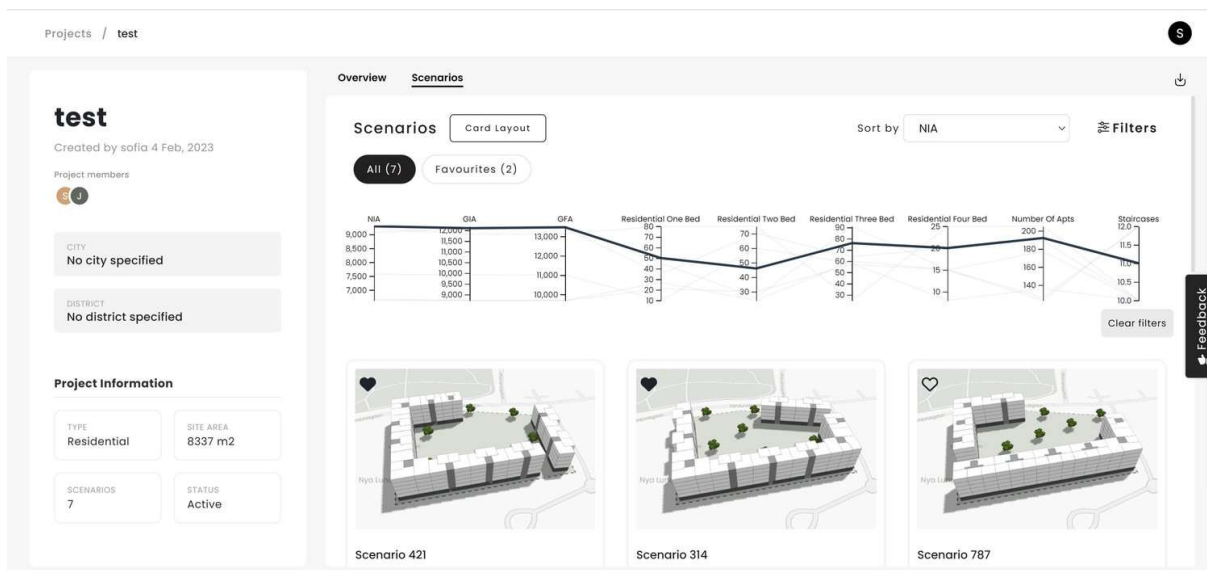


Figura 11: interface da ferramenta Parametric Solutions.
Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.parametric.se/en

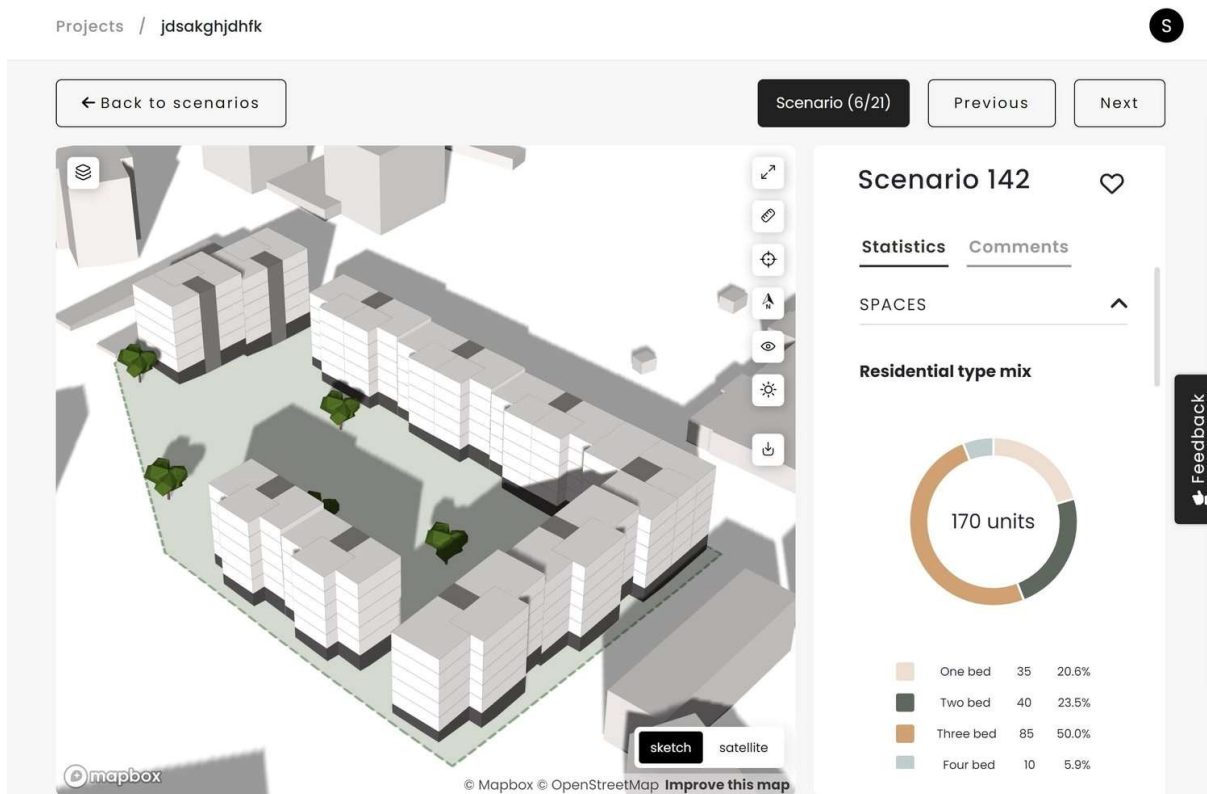


Figura 12: um dos cenários de solução, com detalhes referentes à solução selecionada à direita da interface. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.parametric.se/en

3.2. Geração de plantas

Quanto a ferramentas de geração automatizada de plantas, acabamos lidando com um aspecto controverso da Arquitetura computacional: existe certa resistência por parte dos profissionais de Arquitetura, que acreditam que o uso de tais ferramentas consiste em abrir mão da profissão de arquiteto. Em outras palavras, “os computadores vão acabar com os arquitetos”, e outras declarações afins.

Mas, apesar da controvérsia, é fato que diversos recursos computacionais destinadas à geração automatizada de soluções em planta têm surgido e aquecido os debates sobre o tema. Em nossa busca, encontramos ferramentas de design generativo que funcionam – ou prometem funcionar, dependendo do estágio de desenvolvimento – como catálogos após gerar layouts baseados nos inputs fornecidos, como o perímetro das unidades habitacionais, por exemplo; a outras que eram concebidas como plugins – ou add-ons – para software já existentes e utilizados no processo de projeto

3.2.1. Finch 3d

O Finch 3D é um software em desenvolvimento, encabeçado pelo arquiteto sueco Jesper Wallgren, com o intuito de automatizar a solução de layouts para residências. Ele trabalha a partir de inteligência artificial, design generativo e algoritmo evolutivo, possibilitando soluções para múltiplos pavimentos, mas também não possibilita soluções que não se utilizem de uma planta-tipo.

Originalmente, Wallgren tinha a intenção de criar o Finch como um plugin para o Grasshopper, seguindo a tradição da comunidade de usuários e desenvolvedores possuem de nomear as ferramentas adicionais do Grasshopper fazendo referências a nomes de animais. Com o tempo, porém, Wallgren percebeu que seu projeto era ambicioso demais para se limitar ao que o Grasshopper permite fazer, visto que é um software antigo e com uma série de restrições em seu código quanto a processos mais eficientes nos tempos atuais. Desta forma, o Finch tornou-se um projeto para desenvolvimento de um software independente, denominado Finch 3D, que está em desenvolvimento há pelo menos cinco anos.

Assim como o Parametric Solutions, o Finch 3D se encontra em fase de beta, exclusivo para empresas e escritórios de Arquitetura, e não conseguimos acesso ao

software para teste, mesmo após entrar em contato direto com o líder do projeto. Desta forma, trazemos aqui nossa análise também baseada nos materiais de divulgação disponíveis, que são até abundantes, visto que a ferramenta ganhou notoriedade após repercutir pelas redes sociais algumas vezes.

As soluções do Finch 3D apresentam dois modos principais: o de geração de volumetria e o de subdivisão em unidades de apartamentos, tanto em 2D como em 3D.

Para a volumetria, de maneira geral, os resultados se assemelham aos obtidos através do TestFit, com a diferença que o TestFit foca mais na viabilidade, com preocupações quanto à legislação urbana, estacionamentos e implantação, enquanto o Finch 3D trabalha de forma mais livre. Acredita-se que as restrições serão definidas pelo próprio projetista ao trabalhar com a ferramenta, que vai ter em mãos o dimensionamento que atenda às restrições urbanísticas para o projeto antes de começar a utilizar o software para projetar.

Quanto à solução de layouts, o software também apresenta duas maneiras levemente distintas de se trabalhar: uma que subdivide um perímetro geral do pavimento em unidades e, em seguida, as unidades em ambientes, com layout incluso; e outra que permite a definição das unidades e ambientes manualmente, e que gera automaticamente a solução de layout. Todas as alterações se dão em tempo real, pelo que é possível analisar do material disponível, e são intercambiáveis, ou seja: é possível gerar uma solução automaticamente e depois modificá-la manualmente, por exemplo, sem que isso possa comprometer as demais soluções geradas, como vemos na figura 13.



Figura 13: demonstração da edição manual de plantas no Finch 3D. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.finch3d.com

Por trabalhar baseado em design generativo, assim como o Parametric Solutions, o Finch também permite que avaliemos os resultados a partir de determinados objetivos de otimização, como vemos na figura 14, e escolher entre as soluções que melhor se enquadrem nos objetivos do projeto.

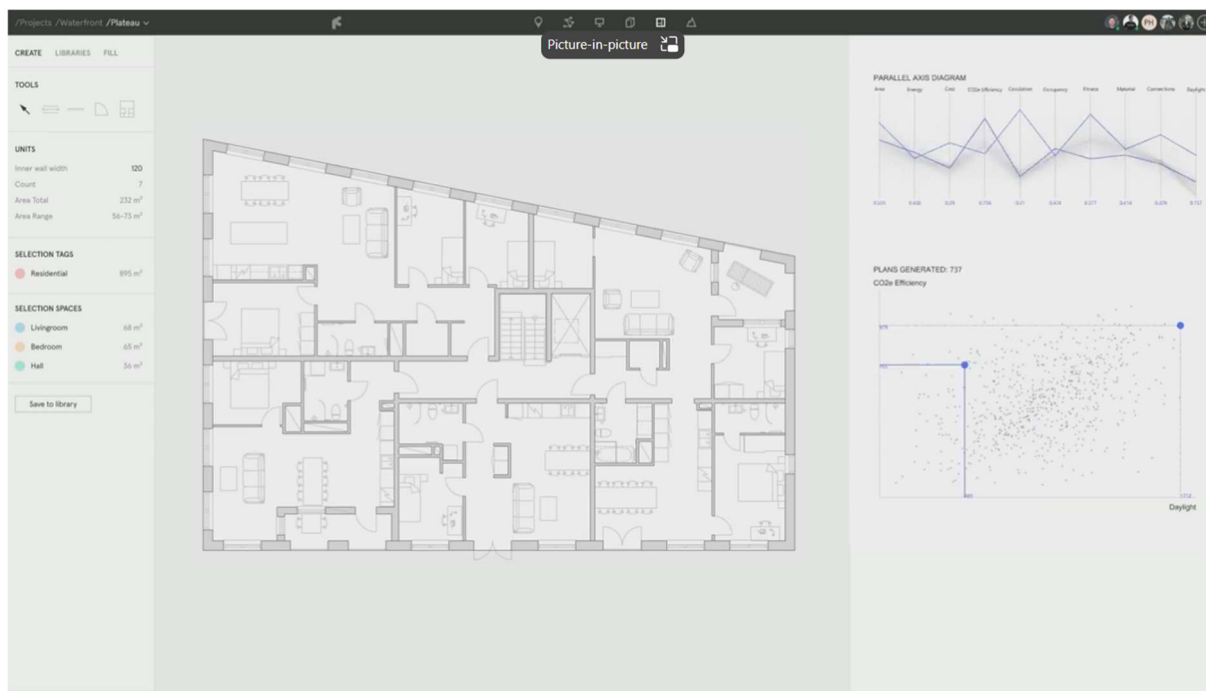


Figura 14: interface do Finch 3D, com os gráficos que representam os algoritmos evolutivos e de geração de soluções à direita. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.finch3d.com

3.2.2. ARCHITEChTURES

Mencionada brevemente enquanto tratávamos sobre as interfaces na discussão sobre customização em massa, o ARCHITEChTURES é uma ferramenta online, baseada em IA, com foco em otimização através de design generativo, nos mesmos moldes do Finch 3D e do Parametric Solutions.

Desenvolvida pela empresa Smartscares Studio, que é baseada em Málaga, na Espanha, a ferramenta está disponível através de assinatura, disponibilizando um período de 15 dias grátis. Porém, nos testes realizados, não conseguimos replicar os exemplos demonstrados nos materiais de divulgação, assim como não conseguimos criar um projeto do zero, a partir de diretrizes próprias. Isso depõe contra a interface do programa, que não se mostrou intuitiva ou amigável (figura 15), nos deixando

limitados a manipular apenas os exemplos já prontos, disponibilizados pelos desenvolvedores (figuras 15 e 16).

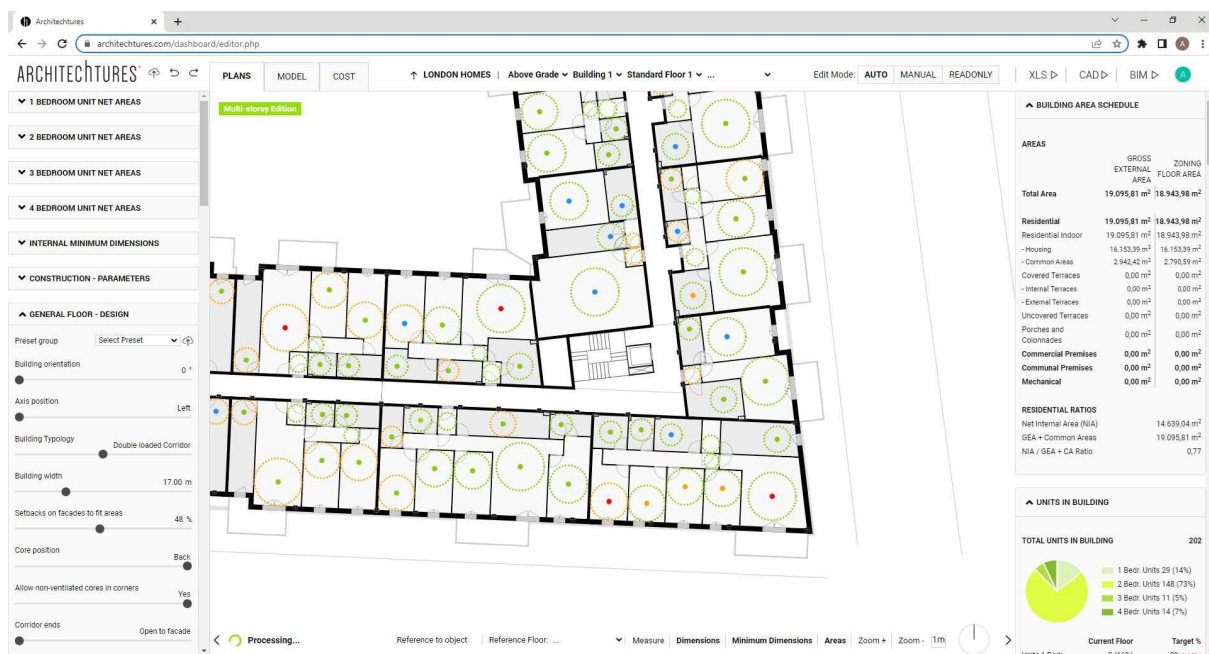


Figura 15: exemplo disponibilizado para teste do ARCHITECTURES. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.architectures.com

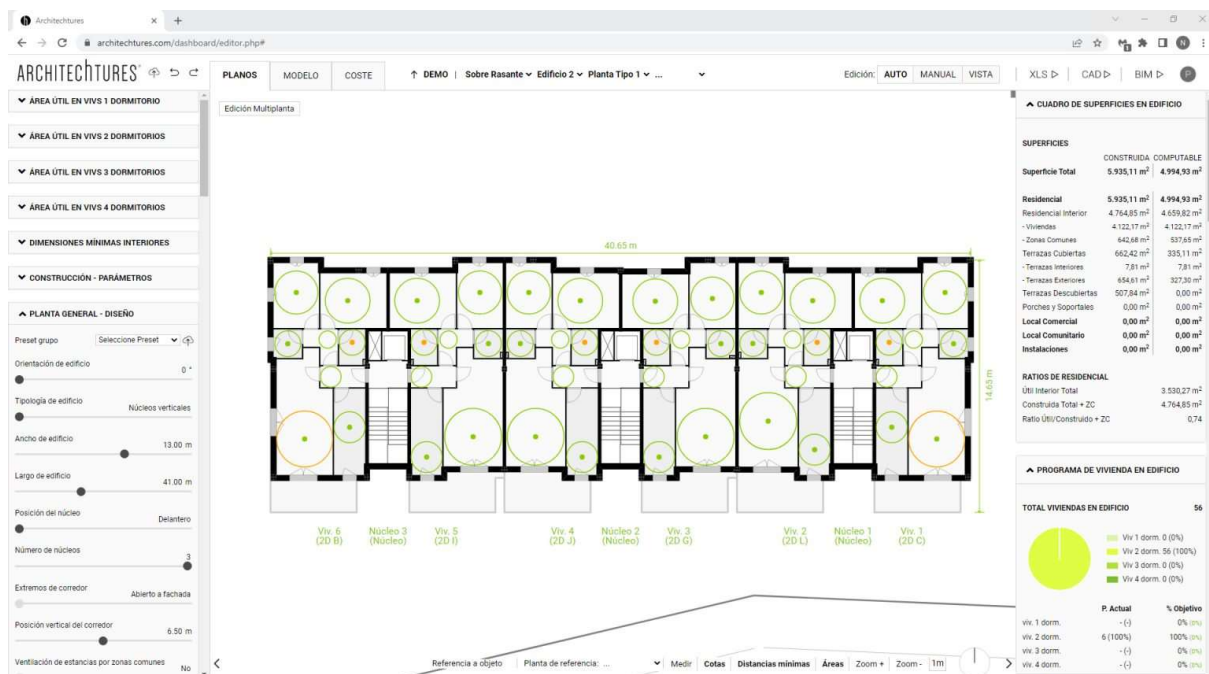


Figura 16: Exemplo de planta gerada na plataforma. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.architectures.com

A volumetria gerada pela ferramenta assemelha-se às geradas pelo TestFit, assim como a preocupação com a implantação e as diretrizes urbanas, gerando uma solução que até apresenta certo grau de variabilidade entre as unidades, mas que replica isso verticalmente (figura 17), gerando a solução em plantas-tipo, conforme vimos no software americano.

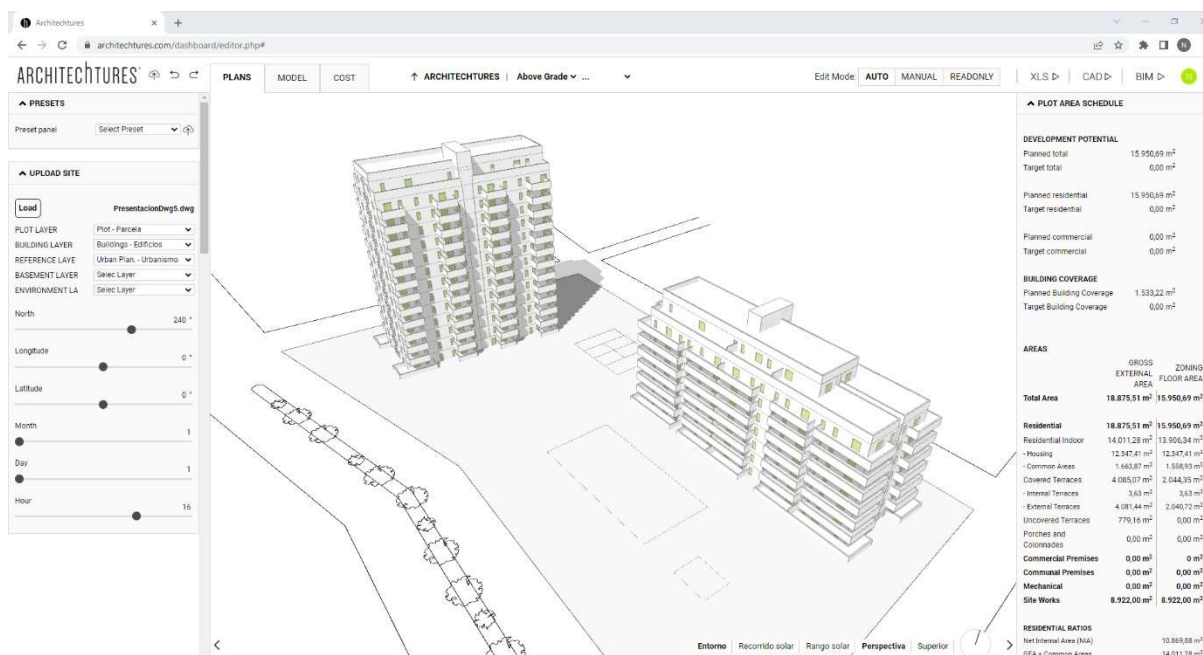


Figura 17: visualização em 3D das soluções geradas pela ferramenta. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.architectures.com

Semelhante ao Finch 3D, o ARCHITECTURES também permite a modificação manual das soluções geradas automaticamente (figura 18), o que traz uma flexibilidade interessante para a ferramenta, visto que eles também trazem os critérios para serem avaliados, de acordo com os preceitos do design generativo.

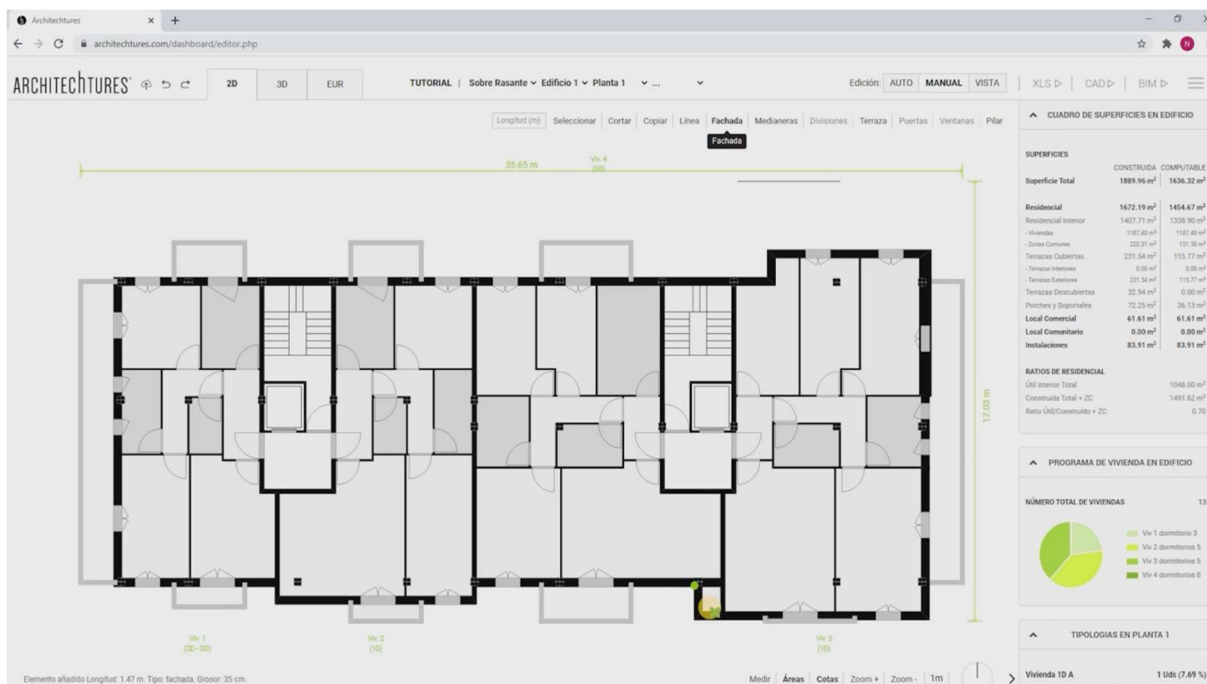


Figura 18: edição manual das plantas na interface. Fonte: divulgação oficial da ferramenta, em www.architectures.com

3.2.3. PlanFinder

O **PlanFinder** é um plugin disponível para diversos softwares, como Revit, Rhinoceros e Grasshopper, que permite a aplicação de templates de layout e posicionamento de aberturas e vedações, de maneira paramétrica, a perímetros de apartamentos pré-definidos. Na versão para Grasshopper, apresenta algumas limitações, pelas limitações que o próprio código-fonte do Grasshopper apresenta, em termos computacionais, mas apresenta processamento rápido, conforme é possível ver na apresentação feita pelos desenvolvedores na plataforma do YouTube, em 5 de abril de 2022, que ainda se encontra disponível (figura 19).

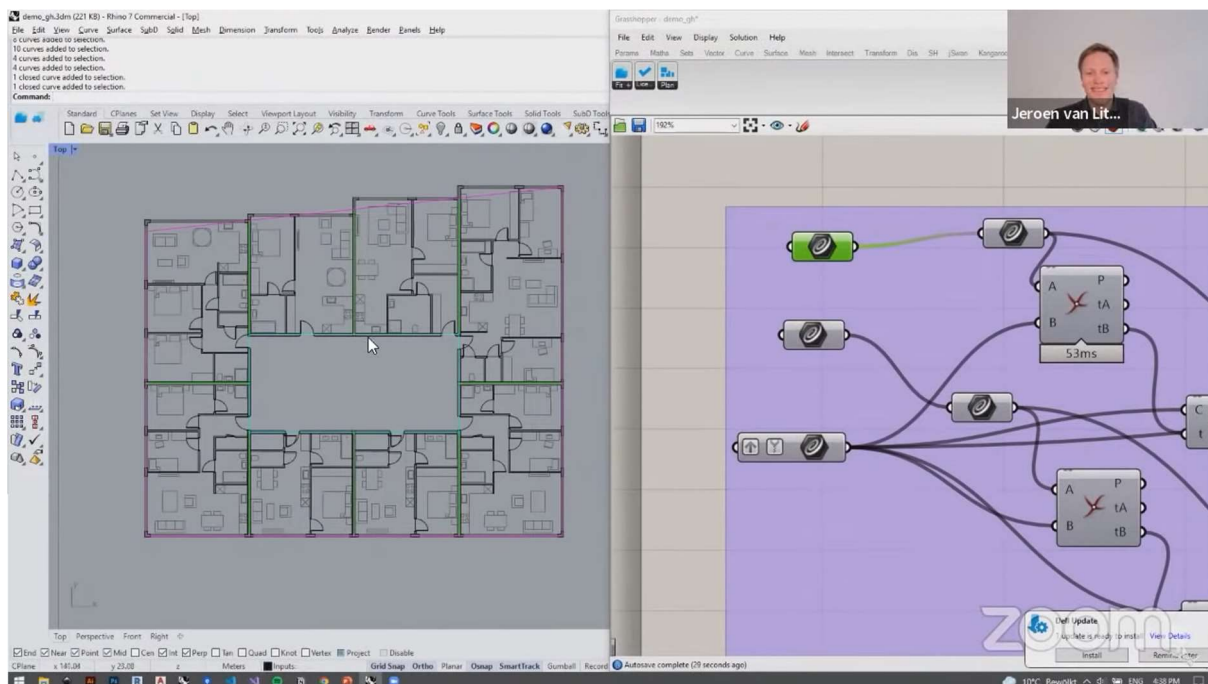


Figura 19: apresentação da ferramenta PlanFinder para Grasshopper durante uma transmissão ao vivo, online. Fonte: captura de tela do autor

Apesar das limitações, especificamente sobre a versão para Grasshopper pode-se dizer que é uma ferramenta que amplia os horizontes, visto que a solução de dimensionamento das unidades pode ser inserida no código e, a partir disso, o plugin gera a subdivisão em ambientes, propõe layouts, aberturas e acessos, inclusive com uma lógica de aninhamento de áreas molhadas, tentando manter banheiros e cozinhas sempre próximos e próximos a seus equivalentes em outras unidades.

Durante o teste, que fizemos durante os 30 dias disponibilizados pelos desenvolvedores, porém, encontramos alguns bugs e erros de geometria, provavelmente decorrentes das limitações do Grasshopper mencionadas anteriormente.

3.3. Conclusões

Com base em todas as ferramentas que analisamos, é possível perceber, principalmente, duas características que valem a pena ressaltar.

Primeiro: existe uma preocupação real e visível para a criação de ferramentas que tragam dados sobre o estudo de viabilidade, pelo menos em algum grau. No caso, enquanto algumas ferramentas como o Place trazem um relatório completo de

viabilidade, com direito a vários dados complementares que enriquecem a análise, como custos e áreas totais e parciais, outras, como a ARCHITEChTURES trazem apenas uma preocupação básica quanto a isso, trazendo apenas uma relação de áreas da edificação gerada e um certo grau de trabalho com implantação.

Em segundo lugar, é possível notar que em todas as ferramentas que analisamos não existe uma preocupação em diversificar a solução das unidades verticalmente, pois todas as que trazem soluções de subdivisão o fazem através da solução tipológica. Isso é compreensível, por um lado, visto que é uma solução bastante aplicada em edifícios verticais, sendo praticamente o lugar-comum. Por outro lado, isso demonstra como nossa pesquisa possui uma lacuna a preencher: a de sistematizar em algum nível a possibilidade de se resolver uma edificação através de design computacional, que ofereça a possibilidade de fugir completamente das plantas-tipo, e garanta o máximo de flexibilidade possível para as soluções das unidades habitacionais.

4. RESULTADOS

Dados os recursos computacionais disponíveis e o domínio da ferramenta Grasshopper, nossa abordagem prática parte então em busca de gerar um código – ou uma *definição*, como geralmente chamado pela comunidade de Grasshopper – que busque solucionar a organização de uma edificação vertical de maneira a garantir flexibilidade e variabilidade. Baseados nas premissas construtivas do Open Building, podemos pensar em uma organização do edifício em que a estrutura não interfira no restante da planta: a planta será livre, as lajes, pilares e vigas serão fixas e rígidas, e o uso de pisos elevados e forros rebaixados garantem a possibilidade de resolver as instalações hidrossanitárias de maneira flexível, sendo necessário apenas limitar a região onde poderiam ser posicionadas as áreas molhadas.

4.1. Algoritmo

Primeiramente, após estabelecer-se que os elementos estruturais – lajes, vigas e pilares – não seriam fatores impeditivos para qualquer tipo de solução em planta, pela adoção de estruturas e vedações ancoradas no Open Building, definimos que a construção poderia se beneficiar de elementos pré-fabricados, como as placas de *drywall*, que possuem dimensões fixas e padronizadas, geralmente de 1,2m ou 1,5m de largura.

Para a organização do código final, baseados nas referências que vimos, optamos por incluir uma etapa inicial de estudos de viabilidade e, após, outra etapa de subdivisão do volume gerado nesse processo. A princípio, as diretrizes eram inseridas no código como parâmetros gerais, para depois serem definidas, de acordo com a legislação do município de interesse do projeto.

4.1.1. Estudo de viabilidade

O código traz uma etapa preliminar, destinada aos estudos de viabilidade (de acordo com as diretrizes urbanas e códigos de obras), ao estudo preliminar de lançamento estrutural, definição do bloco de circulação vertical e das áreas comuns, e uma etapa específica, para estudo de soluções em cada pavimento do edifício, e geração das unidades habitacionais.

Para os estudos de viabilidade, o primeiro input é a curva delimitadora do lote, que definirá o perímetro máximo do projeto, a partir dos afastamentos previstos, e depois será aplicada ao restante dos dados do código, que incluem o volume permitido pela legislação para edifícios na zona escolhida, conforme vemos na figura 20. Esse bloco em forma de tronco de pirâmide seria a representação da restrição volumétrica, conforme o modelo feito pela plataforma Place, que vimos anteriormente. Importante dizer que os moldes desse código de viabilidade se ancoraram bastante nos resultados visuais gerados por essa plataforma. Feito isso, pode-se determinar o gabarito da edificação, posicionar o bloco de circulação vertical e dimensioná-lo, para finalmente subdividir a área restante dos pavimentos em unidades habitacionais (figura 21).

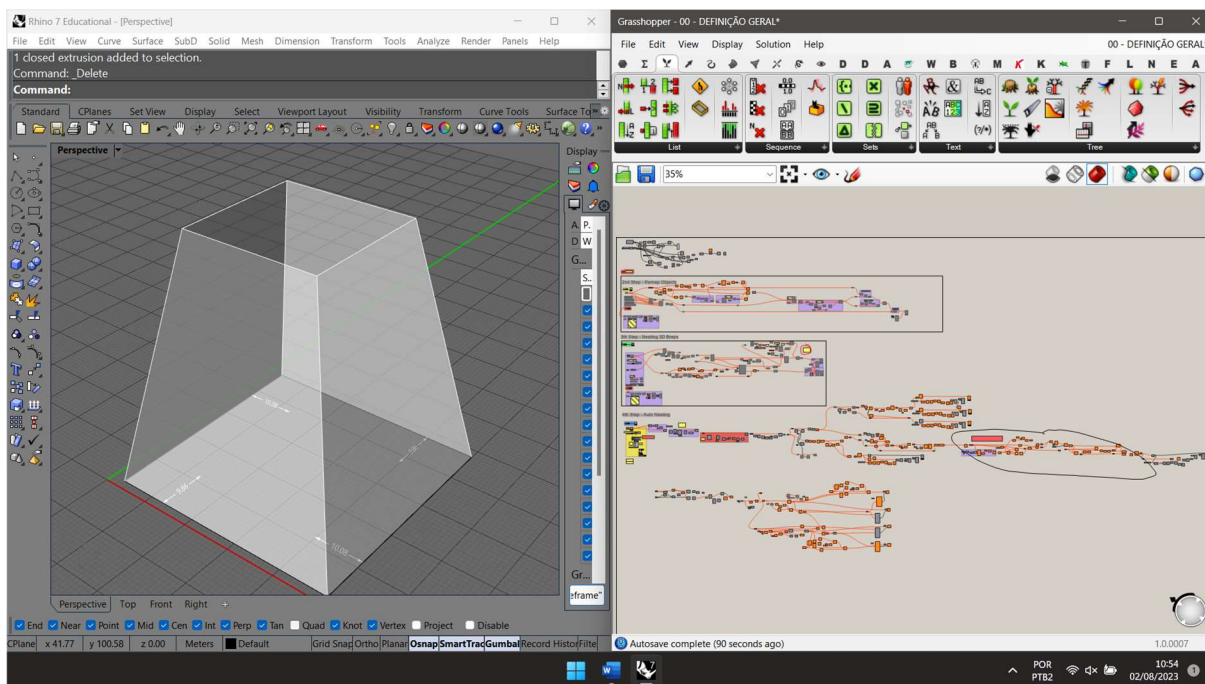


Figura 20: restrições de volumetria Fonte: captura de tela do autor

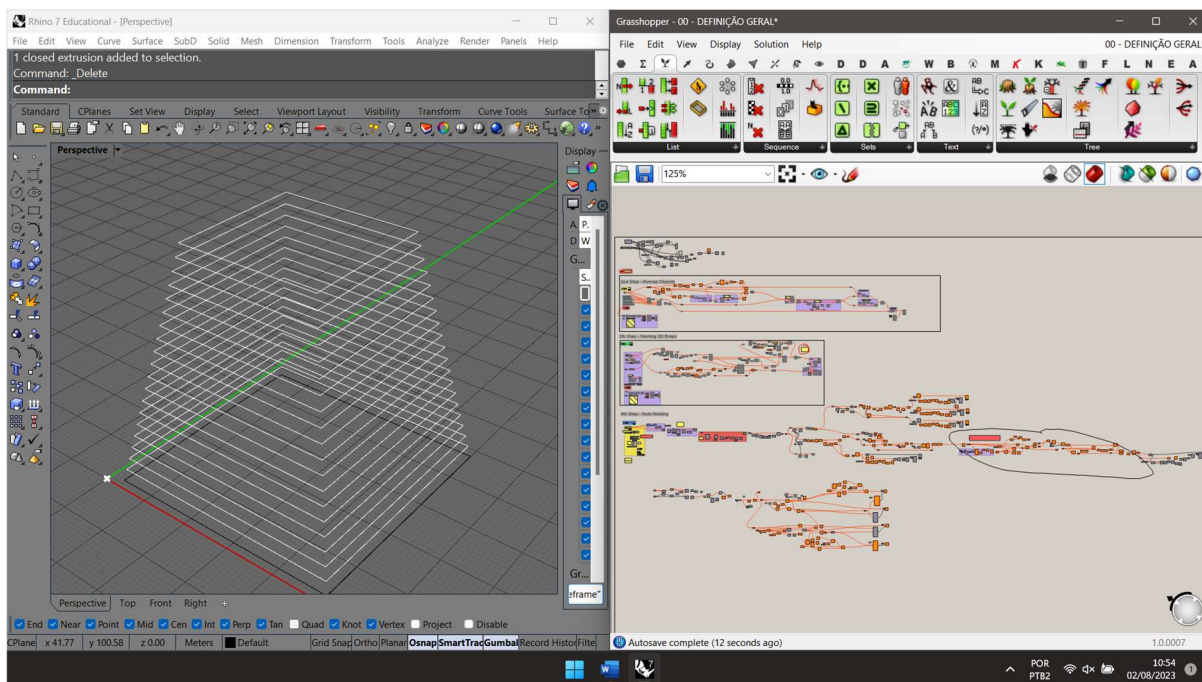


Figura 21: Visualização dos perímetros máximos do edifício respeitando os afastamentos máximos para cada gabarito possível para o edifício Fonte: captura de tela do autor

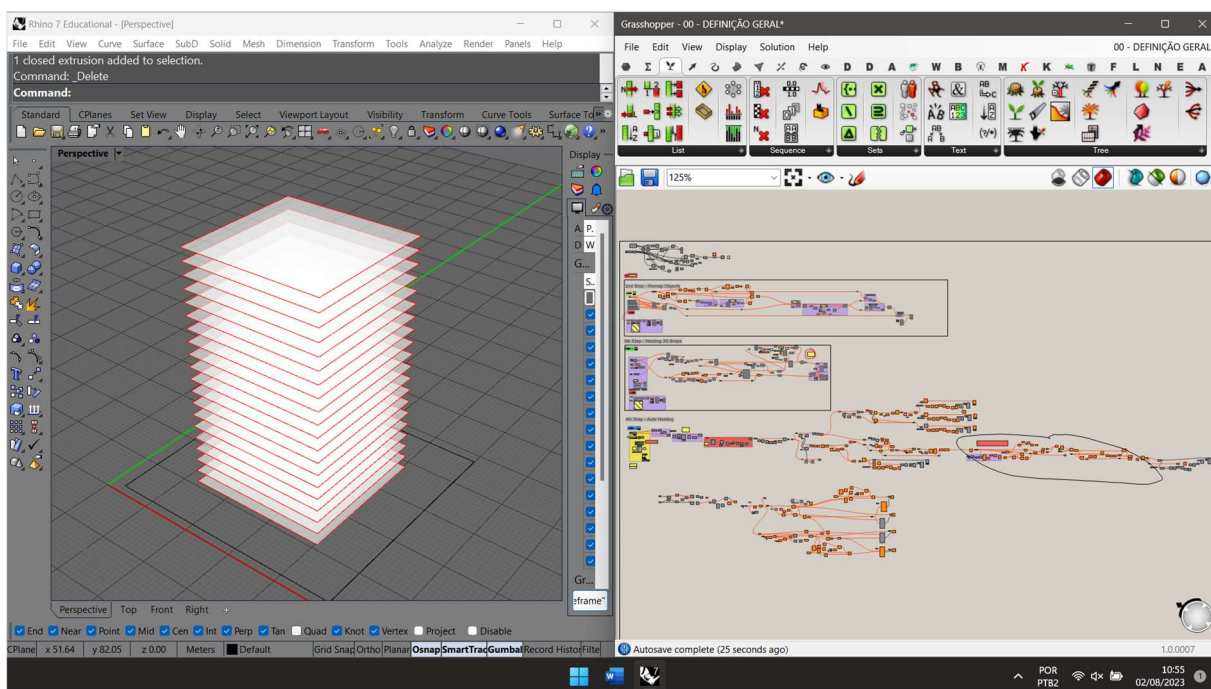


Figura 22: Lâminas de cada pavimento, após definição do gabarito, que define os afastamentos e os pés-direitos. Fonte: captura de tela do autor

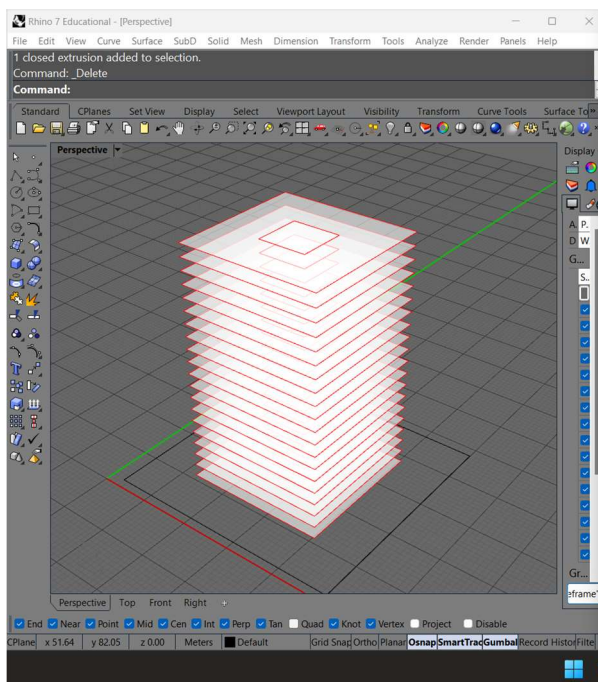


Figura 23: Inserção do perímetro do bloco de circulação vertical no centro do edifício.
Fonte: captura de tela do autor

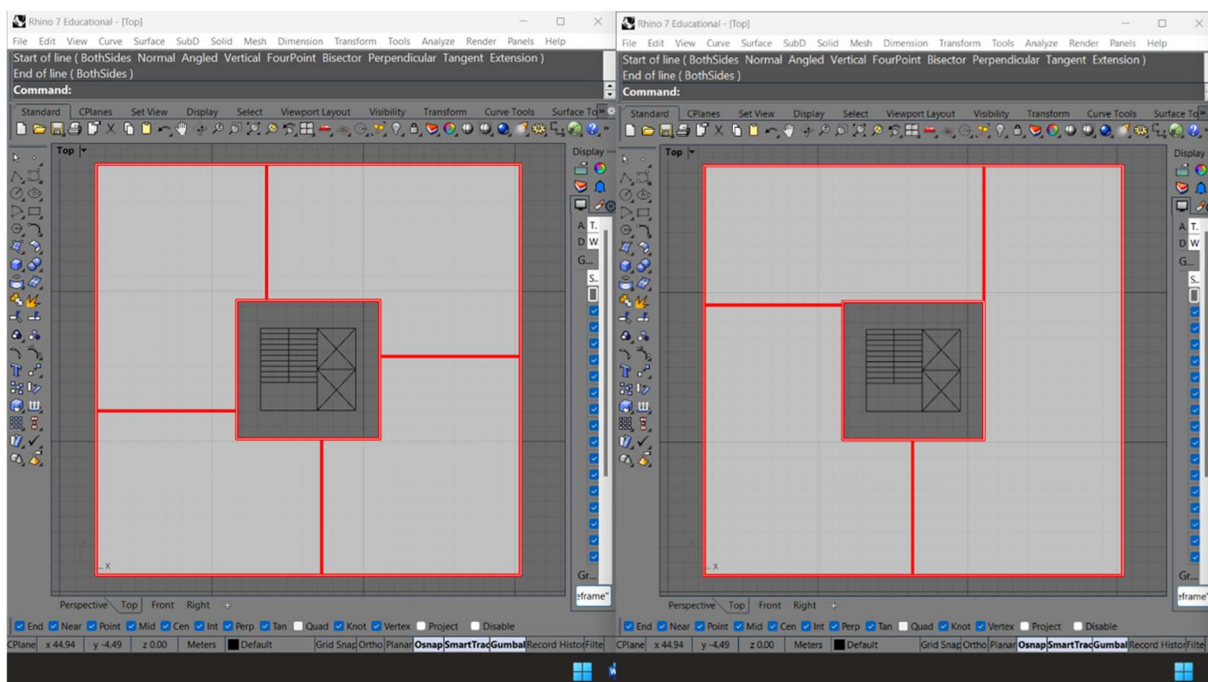


Figura 24: Dois exemplos de possíveis soluções para um pavimento do edifício, levando em conta as decisões tomadas nas etapas anteriores. Fonte: captura de tela do autor

4.1.2. Subdivisão em unidades

A definição de Grasshopper foi baseada em um exemplo desenvolvido pelo arquiteto sueco Jesper Wallgren (2020) e disponibilizado em seu site (finch3d.com), quando o Finch ainda estava em seu início, para ser um plugin para o Grasshopper.

O código permite: a) o projeto da forma do edifício ou perímetro, como formas em L, I, U e várias outras, de modo que se adapte a diferentes contextos de terreno; b) subdivisão de cada nível do plano em diferentes unidades de apartamento, com soluções de tamanho variando de 45m² à área total do pavimento; c) subdivisão interna de cada apartamento em cômodos, de acordo com o tamanho dos componentes de construção pré-fabricados e padrão (drywall, steel-frame e outros); d) subdivisão de cada unidade de apartamento em áreas "secas" e "úmidas", para racionalizar o sistema de encanamento, de acordo com a necessidade de soluções para banheiros, lavabos e cozinhas; e) definição de variações de varanda e sacadas para todas as unidades; f) lançamento estrutural preliminar, para visualizar as posições de vigas e pilares, de acordo com a planta do edifício; g) Conexão com um software baseado em BIM, para obter dados como material, componentes padrão e documentação.

Definimos algumas regras fundamentais para o desenvolvimento do código no Grasshopper:

As unidades seguiriam uma localização linear no plano do pavimento, que faz referência ao perímetro do edifício, determinado por análises prévias do terreno. Para isso, o designer precisa fornecer apenas uma geometria do tipo curva no Rhinoceros, contendo o comprimento total do edifício e sendo perpendicular à divisão. Como input, podemos selecionar a largura das unidades, e o código as distribuirá em blocos retangulares, combinados em diferentes unidades habitacionais.

Para controlar as áreas de cada apartamento, utilizamos como referência um algoritmo de subdivisão criado pelo arquiteto sueco Jesper Wallgren (disponível em finch3d.com), que gera plantas adaptativas. Seu código de Grasshopper funciona com base na área total de um plano, subdividida em diferentes partes de acordo com um fator numérico, que no nosso caso é definido pela variável "Module", que define a dimensão dos elementos construtivos. A parte aproveitada do código de Wallgren consiste de um Looping – ou seja, uma função recursiva – que faz com que, a cada unidade gerada, o código seja lido novamente para gerar uma nova unidade, levando

em consideração a área total restante, definida pela área total do pavimento subtraída da área das unidades geradas. Essa recursividade se repete até que a área restante seja igual a zero. Em seguida, especificamos algumas áreas-alvo (A1, A2 e A3, conforme vistas na figura 25) como sendo as dimensões que desejamos alcançar para cada apartamento. E então temos um quarto parâmetro, Distribution, que randomiza e redistribui a lista de alvos, para que possamos verificar diferentes organizações para cada unidade habitacional. Essa adição nos permite testar resultados diferentes para cada planta e analisar a distribuição de acordo com a forma do edifício ou outras restrições arquitetônicas, sem modificar nenhuma das áreas-alvo. Em outras palavras, o código pode pegar as peças divididas e mesclá-las de acordo com as áreas que definimos como alvos. Na etapa seguinte, podemos decidir o número de níveis ou pavimentos e adaptar as funcionalidades às particularidades que enfrentamos em cada contexto.

Cada apartamento é dividido em duas partes: uma relacionada a áreas úmidas, que concentra as instalações sanitárias e sistemas de encanamento, e a outra é destinada a áreas de convivência pessoal ou social, como quartos, salas de estar e salas de jantar. O lado das instalações sanitárias concentra a parte hidráulica e é reservado para banheiros, lavabos, cozinhas e lavanderias, próximo ao acesso e circulação vertical. O outro lado proporciona possibilidades para varandas e permite maior iluminação natural e circulação de ar.

As superfícies das paredes seguem uma estrutura padrão industrial de drywall, com multiplicadores de 1,5 metros de distância. Essa modulação de 1,5 metros pode acomodar banheiros mínimos e lavanderias, aumentando para quartos mínimos de 3,0 metros por 3,0 metros, e assim por diante, até dimensões maiores para qualquer cômodo. Com essa lógica de ponto de partida, o código pode resolver as primeiras etapas pré-dimensionais e subdividir a área do piso em múltiplos de 1,50 metros por 1,50 metros. Como última etapa, é possível definir um sistema estrutural preliminar, estabelecendo os parâmetros para a distância e dimensões de pilares e vigas. Essa estrutura resulta no código visto na figura 26.

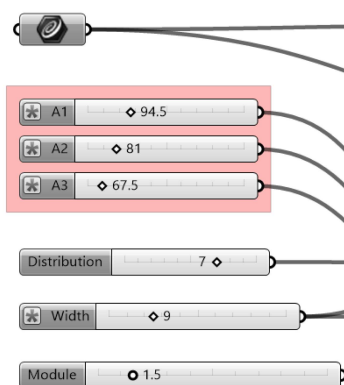


Figura 25: O componente de geometria, no topo, é um input para a curva-guia. "Width" significa a profundidade das unidades, ou o afastamento entre a curva-guia e o limite mais externo do perímetro. E "Module" é o tamanho dos componentes construtivos pré-fabricados, no nosso caso, placas de drywall com 1,5m de largura. Fonte: os autores.

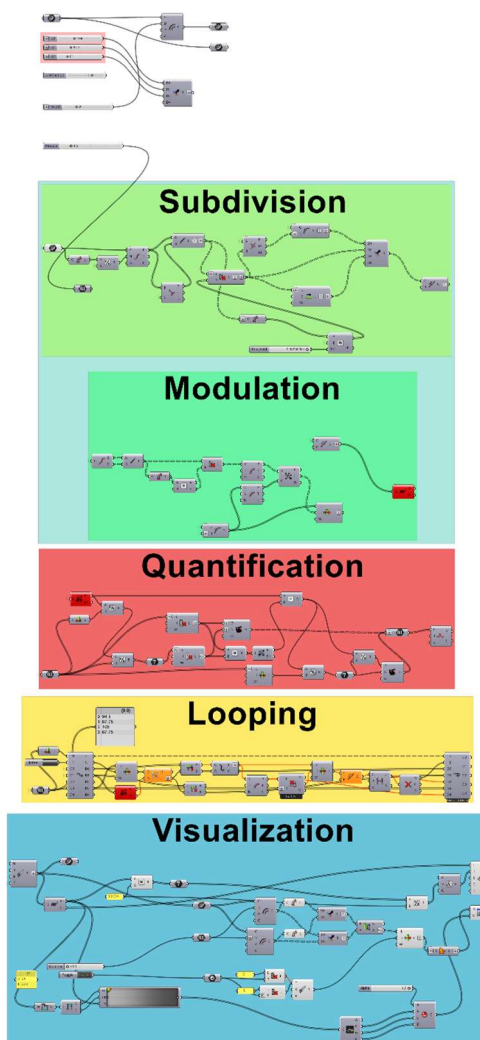


Figura 26: Esta definição no Grasshopper permite a subdivisão de cada planta. As etapas definidas como "Subdivision" e "Modulation" organizam a geometria de acordo com as configurações dos parâmetros de Largura e Módulo. "Quantification" e "Looping" derivam do código de Jesper Wallgren (2020). A primeira soma a área alvo e relaciona o número delas que será criado na etapa de "looping". "Visualization" é usada para definir a aparência tridimensional visual do modelo resultante. Fonte: os autores.

Uma vez que o sistema estrutural base pode ser definido por meio do algoritmo, sendo o posicionamento preliminar de vigas, colunas e lajes a principal preocupação, nesse caso, podemos dizer que esta parte pode definir a porção de Suporte do edifício, de acordo com as definições de Habraken (1961) e Kendall (1999). Em seus estudos, o Suporte vai além da parte concreta do edifício: ele inclui também o entorno, o bairro e a relação dos moradores com esses elementos (Avalone; Fettermann, 2020; Kendall, 2004). Quanto à camada de Preenchimento, que não está no escopo deste trabalho para além da delimitação dos perímetros das unidades, estabelecemos que ela pode ser resolvida por soluções padronizadas disponíveis no mercado da construção, como drywall, madeira, alumínio e aço, e sistemas de isolamento e encanamento padrão, desde que possam ser facilmente montados e desmontados conforme necessário. Todas essas soluções já aparecem em outros projetos baseados em Open Building ao redor do mundo (Kendall, 2017).

Na figura 27 abaixo vemos, à esquerda, o perímetro de exemplo que utilizamos no código de estudo de viabilidade, e à direita, a diversidade de soluções por pavimento que o código de subdivisão permite a partir de uma geometria com essas características, sem repetir uma mesma solução ao longo de todos os vinte pavimentos.

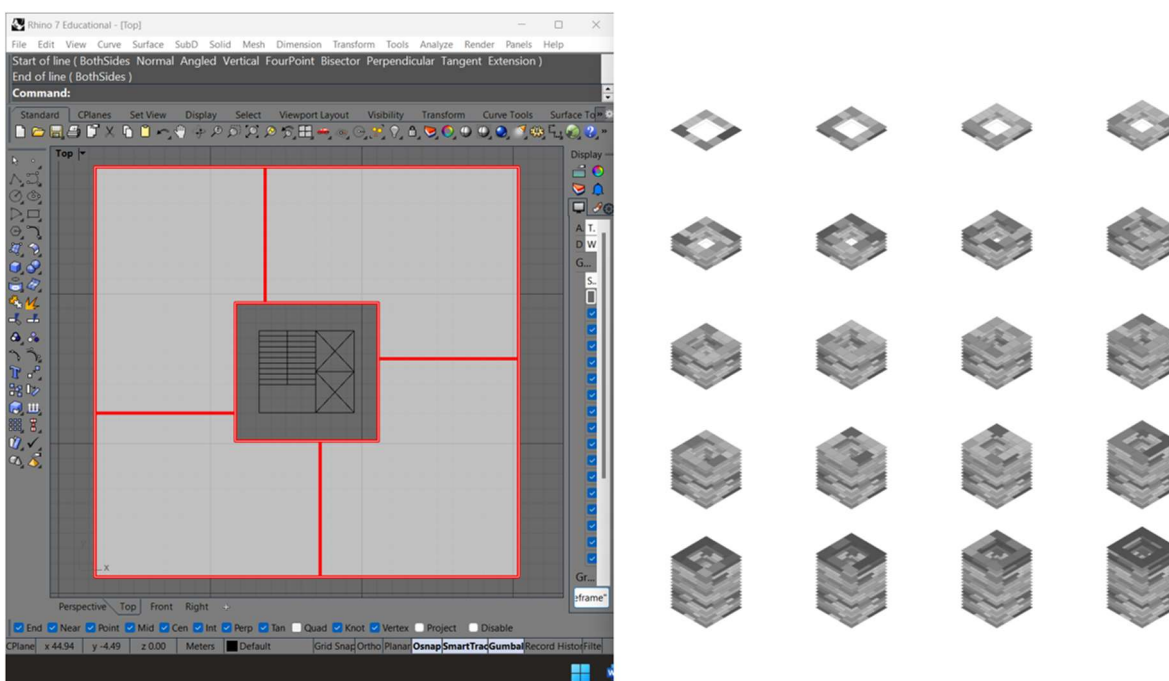


Figura 27: exemplo gerado na etapa de estudo de viabilidade, à esquerda, e soluções possíveis com o código desenvolvido, à direita. Fonte: os autores

4.2. Aplicação

Como forma de manter o processo de design sempre alimentado por informações referentes a custos e propriedades dos materiais, propusemos o uso de transmissão de dados entre a modelagem paramétrica no Grasshopper e o Archicad da Graphisoft, por meio do plugin Archicad Live Connection, como sugerido por Veloso et al. (2018), em seu estudo sobre layouts customizados, devido à sua interface amigável e à tradução fácil e rápida do código do Grasshopper para o modelo 3D do Archicad. Como abordagem construtiva, para possibilitar uma fabricação de custo mais baixo, e que também seja flexível e fácil de modificar, escolhemos componentes padronizados, como drywall e estruturas de aço, já disponíveis na indústria da construção. Mesmo esses componentes de construção em específico não sendo personalizados, como produzidos através de fabricação digital, como por exemplo, a impressão 3D, o código permite várias soluções arquitetônicas e combinações.

Através desse fluxo de trabalho, podemos alterar toda a subdivisão em cada pavimento e atualizá-la em tempo real, enquanto o modelo BIM também atualiza todas as informações, representações gráficas e estatísticas. Esse fluxo de dados permite um sistema interconectado para projetar, analisar, avaliar, reconfigurar, ajustar e verificar cada etapa do fluxo de trabalho, de maneira direta e sem retrabalhos.

O código visa em possibilitar o estudo de soluções de perímetros de apartamentos, em edifícios verticais. O diferencial está centrado em trazer soluções que não se baseiem em plantas-tipo, para que se permitam soluções projetuais para diferentes demandas e perfis familiares. Desta forma os estudos do Open Building entram como base, para trazer diretrizes para os projetos das instalações hidrossanitárias, elétricas, circulações verticais e ambientes comuns, por exemplo, que entrariam na camada de Suporte da edificação, de caráter mais rígido, e para os projetos das unidades habitacionais, vedações, acessos e circulação horizontal, que cairiam no escopo de Preenchimento da edificação, de caráter mais flexível.

Além disso, diante da realidade brasileira da construção civil, faz-se necessário levar em consideração as legislações e exigências dos códigos de obras e planos diretores. Neste caso, como cada município possui seu próprio repertório de normas, para o contexto do nosso trabalho foram adotadas diretrizes do bairro Belvedere, em Belo Horizonte – MG, definidas pelo Plano Diretor da cidade. A escolha se deu pela capital se tratar de uma metrópole, com perfis diversos de potenciais usuários para as

unidades habitacionais, e por possuir zonas residenciais estabelecidas onde os gabaritos podem atingir grandes alturas, como 15 a 20 pavimentos, o que não é permitido em Viçosa – MG, por exemplo.

Após os estudos de dimensionamento e orientação solar, definimos a curva-guia como input no algoritmo, gerando as primeiras possibilidades de design. Essas possibilidades serão direcionadas para o design do Suporte, no que diz respeito à Teoria do Suporte de Habraken (1961) para Open Building, sendo considerado como Suporte, neste caso, a estrutura e as lajes para cada unidade habitacional, conforme vemos na figura 28. A figura mostra um esquema dos elementos estruturais, modelada através da conexão com o Archicad. Neste exemplo, mostramos a forma da curva-guia para o contexto urbano selecionado, em formato de L. Os pilares e vigas, neste exemplo, são perfis H e I, com dimensões arbitrárias, escolhidos apenas como uma representação geral das possibilidades, mas que poderiam perfeitamente ser dimensionadas por um projetista estrutural e ter essas propriedades atribuídas ao modelo, através do código. A camada de Preenchimento do edifício poderá então ser analisada individualmente para cada unidade, em outra etapa do design.

Como a estratégia é atender a diferentes perfis familiares, testamos diversos valores numéricos como inputs para as áreas-alvo. Decidimos que os níveis inferiores teriam mais unidades de menor tamanho, enquanto os andares superiores teriam menos unidades de tamanhos maiores.

Para os layouts internos, definimos uma estratégia para manter os quartos no lado leste, enquanto as áreas úmidas, que concentram os sistemas de água, no outro lado. Todos os cômodos têm luz natural e circulação de ar como premissa. Como última etapa, projetamos um sistema para criar uma série de varandas ao redor de todo o prédio, que segue a variedade do plano interno na fachada. Seguindo um padrão alternado de avanço de 1,5 m ou 3 m, as varandas desenharam um zigue-zague ao redor de cada pavimento, e os ângulos das divisas mudam nos limites entre os apartamentos.

Como resultado, o algoritmo nos permite explorar diferentes soluções de design possíveis para a porção de Suporte, dentro de diferentes formas de edifícios. O arquiteto pode definir os limites do pavimento – ou seja, a curva-guia – após realizar a análise do local e calcular a área total, na etapa de estudo de viabilidade. O projetista também pode explorar várias possibilidades antes de escolher as melhores de acordo com suas restrições ou objetivos.

Na figura 29, vamos algumas dessas possibilidades de projeto. Na parte superior, estão os parâmetros de áreas-alvo e distribuição. Logo abaixo, há a curva-guia como perímetro de cada edifício. Em seguida, um exemplo de subdivisão do pavimento em apartamentos e sua distribuição vertical é empilhado na forma do edifício. Cada curva-guia diferente resulta em edifícios de formas diferentes, de modo que o Suporte para esse edifício pode ser estudado e definido. Após esta etapa, cada unidade habitacional pode ter sua porção de Preenchimento projetada individualmente, como mostram as figuras 30 e 31.

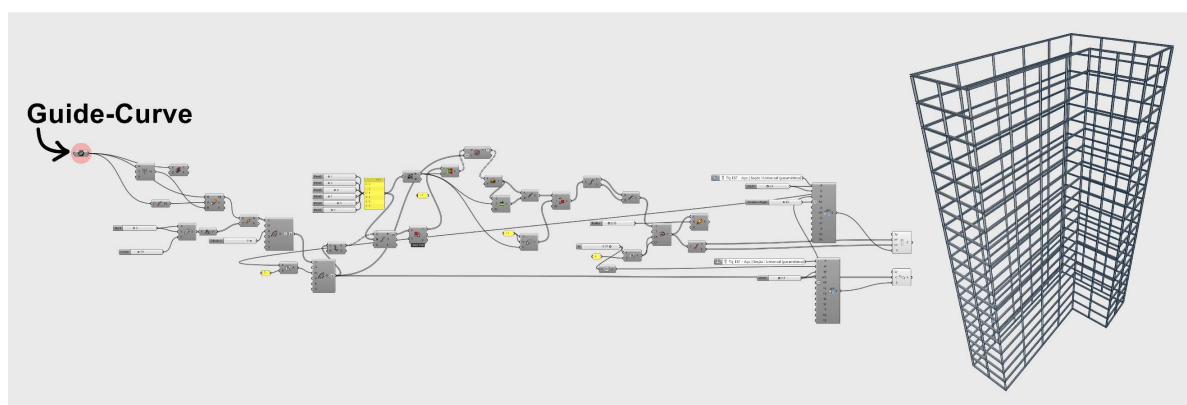


Figura 28: Código para geração do lançamento estrutural, com conexão ao Archicad.
Fonte: os autores.

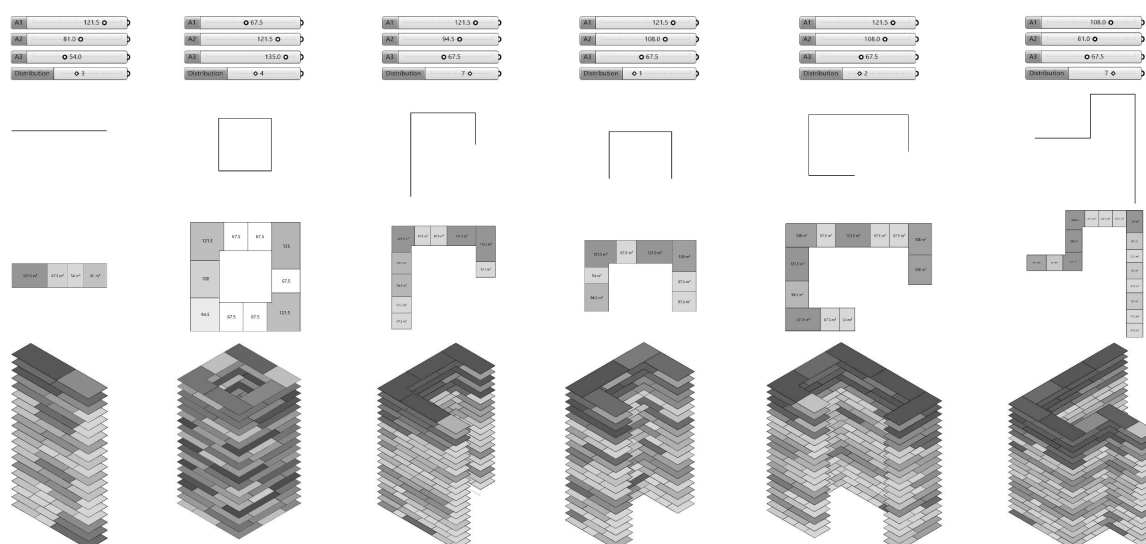


Figura 29: possibilidades obtidas através do código, com diferentes curvas-guia. Fonte: os autores.

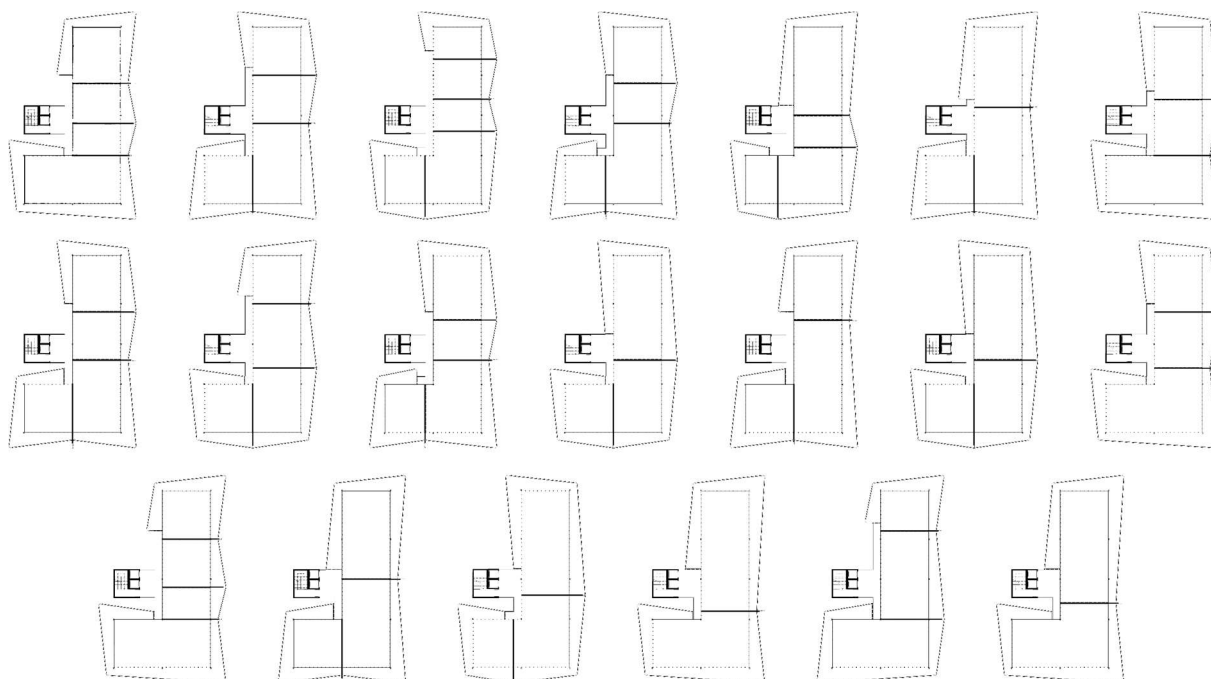


Figura 30: Os vinte andares do edifício final, gerados no Archicad, foram construídos com lajes e paredes, e as varandas foram estrategicamente projetadas para representar a variabilidade do plano e tamanhos dos apartamentos. Fonte: os autores.

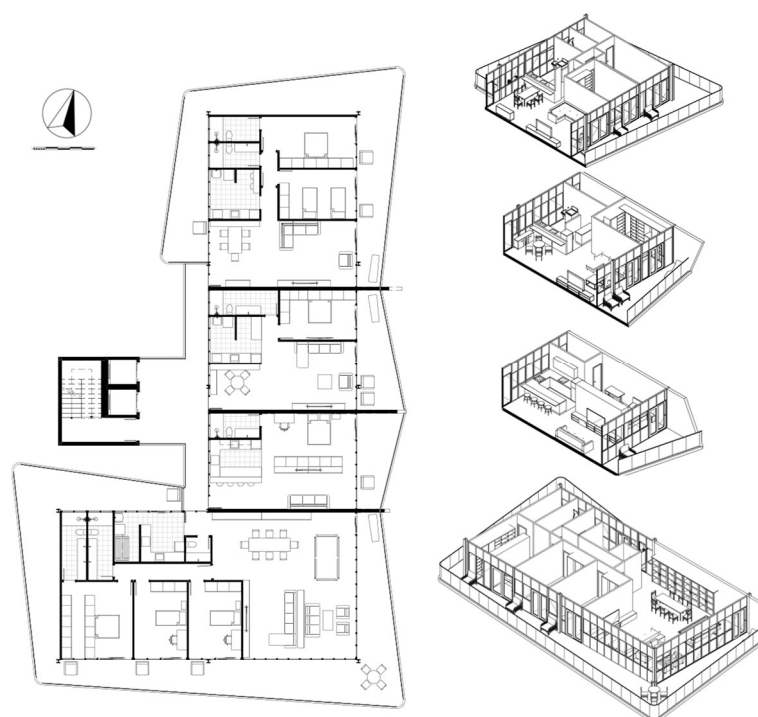


Figura 31: À esquerda, o primeiro andar do edifício, com um estudo de layout, cada cômodo com uma possível solução de acordo com o tamanho da unidade, pensado para atender aos diferentes perfis familiares. À direita, perspectivas dos apartamentos para uma melhor compreensão do espaço criado. Fonte: os autores.

Uma outra reflexão que gostaríamos de trazer aqui é sobre a posição dessa nossa ferramenta no fluxo de trabalho. Sendo uma ferramenta que gera as subdivisões nas plantas de cada pavimento, conforme já discutimos, isso deixa claro que o projeto já deve ter passado da etapa de definição do perímetro e da forma volumétrica da edificação, porém ainda não chegou à etapa de projeto de cada unidade habitacional e, ainda menos, à etapa de disposição de layout. Desta maneira, nossa ferramenta se encontra aproximadamente numa etapa intermediária entre as principais ferramentas existentes, das quais apresentamos aqui em nosso capítulo de referências.

Dizemos isso para levantar a discussão de que, como ferramenta intermediária, provavelmente as etapas de estudo de viabilidade e de projeto das unidades podem ficar para outras ferramentas, essas mesmas que já se encontram disponíveis.

Por exemplo, num fluxo de trabalho que utilize-se da nossa ferramenta, podemos visualizar, por exemplo, a aplicação da plataforma Place, que nos traria os estudos de volumetria e áreas parciais e totais do empreendimento, gabarito e demais diretrizes; a partir disso, poderíamos passar os perímetros de cada pavimento pelo nosso código, que seria responsável por subdividi-los e organizações distintas de unidades para cada um deles (como sempre, enfatizando a fuga da solução em plantas-tipo); e, finalmente, após essa etapa, poderíamos aplicar essa subdivisão a uma outra ferramenta que trabalhe a organização de um apartamento, como o Finch 3D ou o PlanFinder para Grasshopper, que divide os ambientes, definindo o funcionamento e prevendo o layout, para garantir o dimensionamento adequado.

Contudo, para testar a validade dessa reflexão a respeito dessa possibilidade, fizemos o experimento de aplicar, de fato, as quatro primeiras soluções de plantas apresentadas na figura 30, ao código de geração de layout disponibilizado como exemplo com o PlanFinder para Grasshopper, e os resultados são os que vemos a seguir. Deixaremos de lado neste momento quaisquer comentários a respeito da qualidade das soluções de projeto resultantes, visto que muito do estilo de Arquitetura aplicado nesse plugin é decorrente de Arquitetura europeia, visto que os desenvolvedores são neerlandeses.

Para a solução da primeira planta, o PlanFinder foi capaz de organizar os ambientes e distribuir o layout, conforme podemos ver na figura 32. É possível notar

uma pequena inconsistência entre o perímetro original e o resultado final na extremidade esquerda da planta, mas nada muito comprometedor.

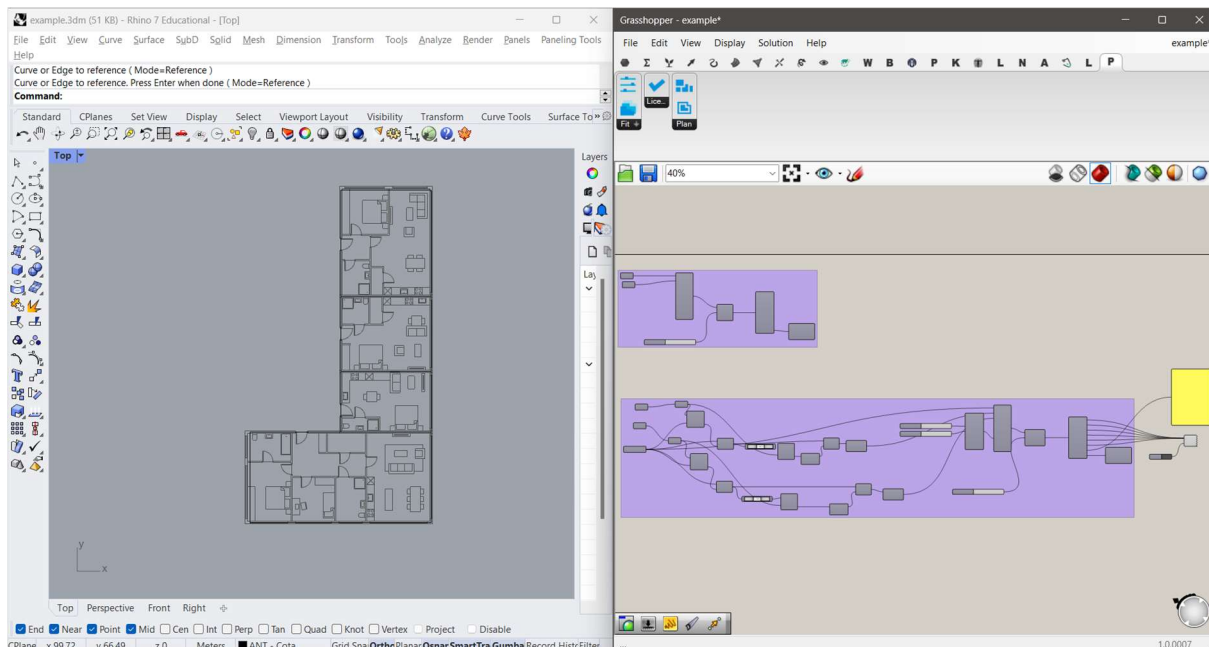


Figura 32: Solução do PlanFinder para a primeira planta do nosso projeto de exemplo. Fonte: captura de tela do autor

Porém, já na segunda planta problemas começaram a surgir, conforme mostramos na figura 33. Um exemplo dos bugs que mencionamos em nossa análise sobre o PlanFinder, capítulos atrás. O plugin não gerou nenhuma solução para a planta do segundo pavimento, e não houve uma maneira de corrigir esse erro, todas as variações dos parâmetros resultavam na nulidade de todas as soluções.

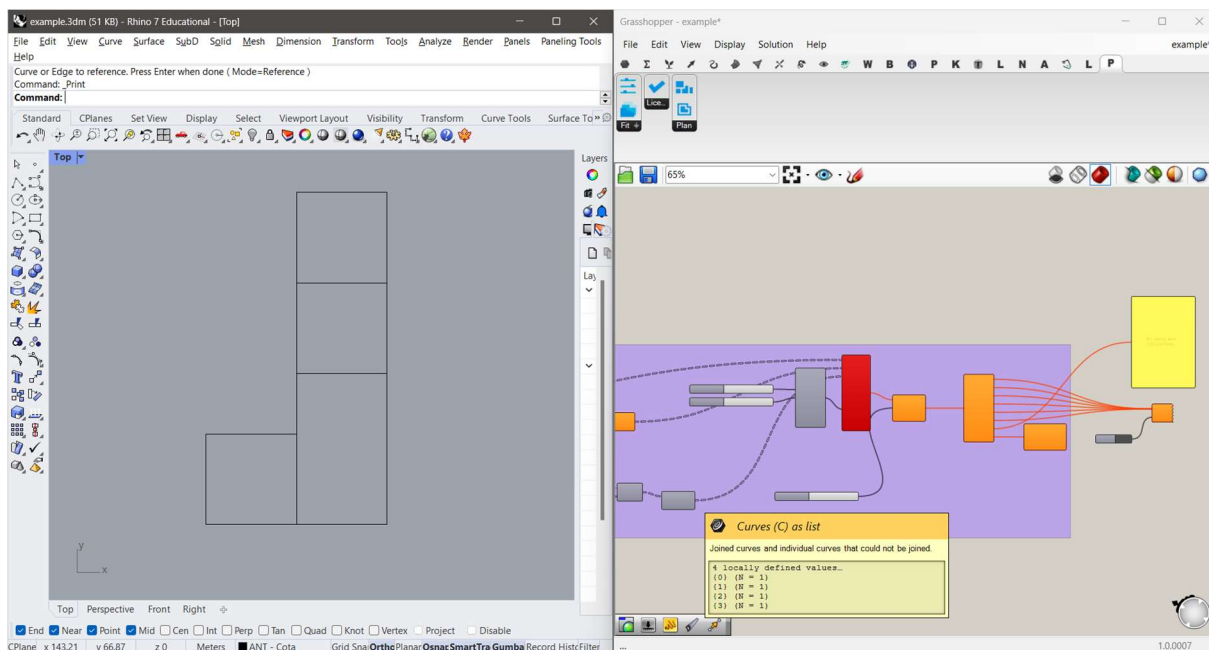


Figura 33: Planfinder não gerou nenhuma solução para a planta. Fonte: captura de tela do autor

Para a planta do terceiro pavimento, conforme mostrado na figura 34, o plugin gerou soluções para apenas quatro dos cinco perímetros fornecidos, e novamente nenhuma modificação nos parâmetros conseguiu resolver essa questão. Também é possível notar algumas inconsistências entre os perímetros originais no canto inferior esquerdo da planta, mas novamente, nada de escala absurda ou comprometedor. De fato, o problema percebido nessa planta foi quanto ao apartamento que não teve uma planta gerada, e, portanto, independente de qualquer configuração que pudesse ter sido mal executada.

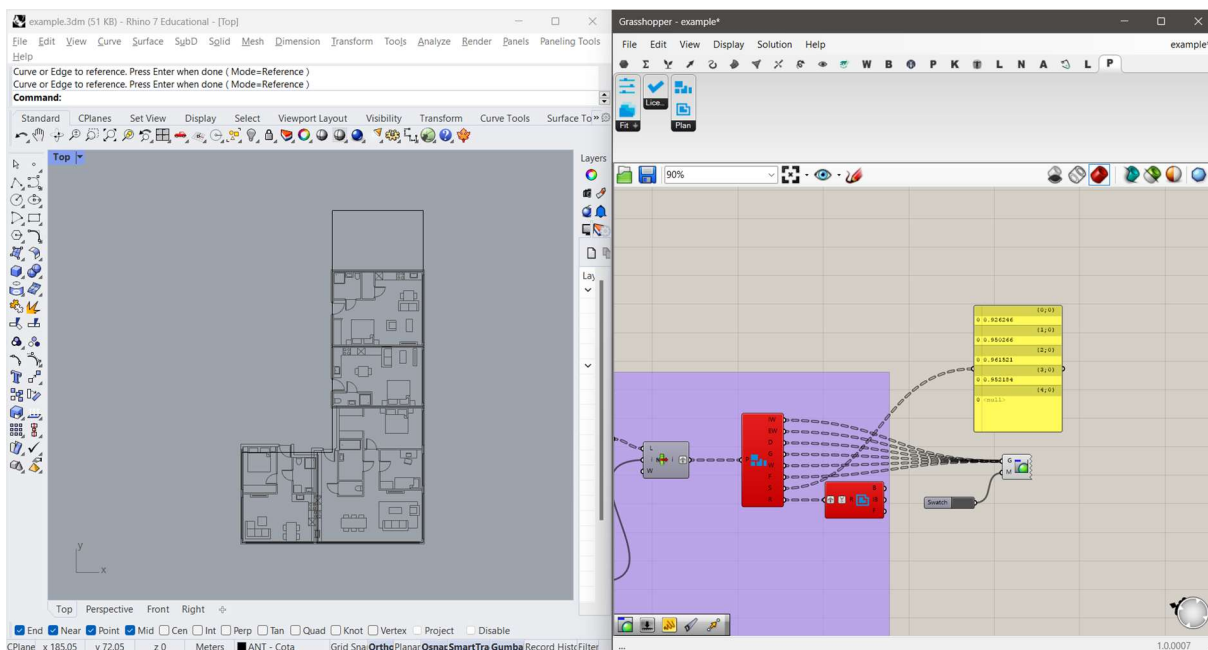


Figura 34: PlanFinder gerou as soluções para quatro dos cinco perímetros de input.
Fonte: captura de tela do autor

Por fim, na planta do quarto pavimento na figura 35, novamente todas as unidades tiveram soluções propostas pelo código do plugin, apesar de algumas inconsistências entre o input e o output, que esteve presente em todos os exemplos que demonstramos aqui.

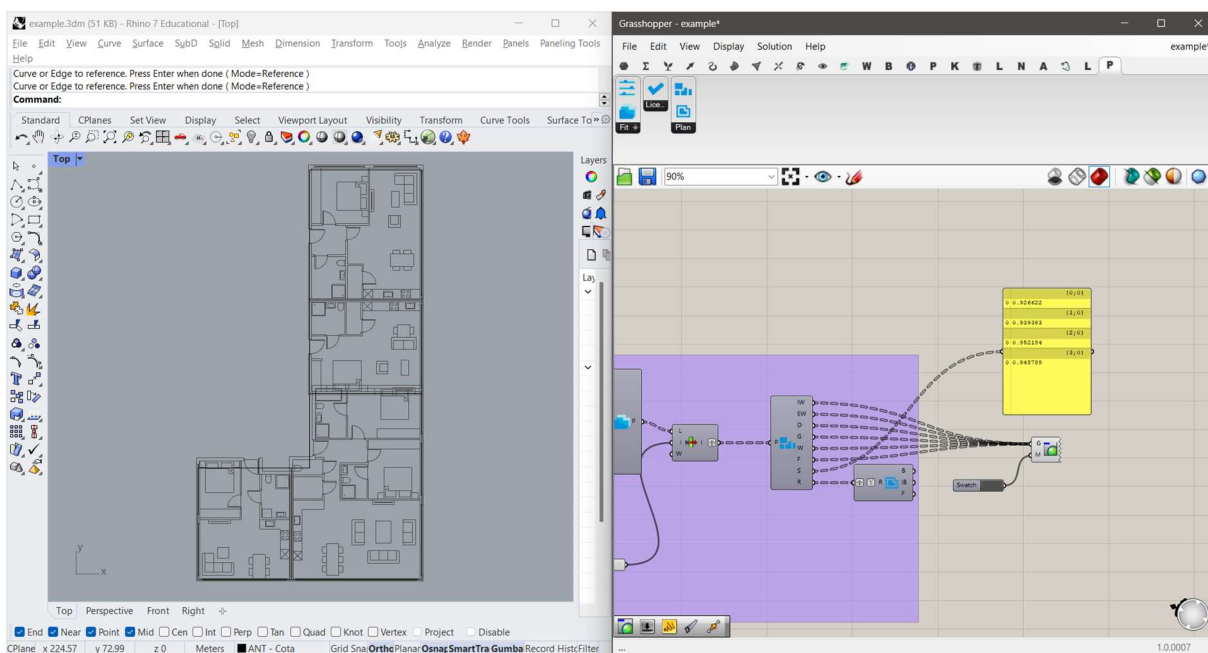


Figura 35: solução do PlanFinder para as plantas das unidades do quarto pavimento.
Fonte: captura de tela do autor

Com isso, partimos para as seguintes reflexões:

Primeiramente, os resultados apresentam uma possibilidade de organizar uma solução, com as devidas restrições e as devidas liberdades para o usuário modifica-la, e as soluções podem ser diversificadas o bastante para gerar algumas centenas de possíveis soluções. A aplicação do plugin PlanFinder na nossa experimentação realizada aqui nos mostrou que, por mais que seja um caminho, a solução ainda não está completa. Falta mais refinamento na organização do layout e, claro, também falta um plugin como esse que leve em consideração a lógica arquitetônica brasileira, visto que os padrões europeus ou norte-americanos não se encaixam bem em nossa realidade.

Nota-se também que, apesar de serem um tópico relevante, a solução dos projetos hidráulicos e sanitários podem não ter tanto peso para uma solução flexível de projetos num contexto de edificação vertical. Foi uma preocupação que tivemos no decorrer do nosso trabalho, mas, ao final, a solução se encontrava em duas das características que trouxemos para o nosso projeto, sendo elas a estrutura Esqueleto/Preenchimento e a outra a lógica de sistemas independentes no edifício, com estrutura, forro e pisos independentes da posição das paredes. Isso permite que a solução da tubulação, com os devidos cuidados quanto a escoamento e fluxo, seja realizada sem maiores complicações. Claro, a nível teórico, pelo menos.

Por fim, a maior questão recai sobre a aplicabilidade e a replicabilidade do código, no sentido de que realmente foi alcançado o objetivo de diversificar ao máximo as soluções de projeto. Utilizando o nosso código, é possível estudar variadas maneiras de organização de um edifício vertical que não se ancora em soluções tipológicas e que, ainda, consegue propor uma organização para os sistemas que seja funcional e facilmente adaptável, de maneira a garantir a flexibilidade para atender as diferentes necessidades dos diferentes perfis, mesmo em um contexto de verticalização, onde teoricamente, a lógica seria recorrer a soluções amarradas e repetitivas, com cada vez menos personalidade. Com o nosso código, podemos trazer soluções que recuperam essa possibilidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas considerações a serem feitas referentes ao trabalho que apresentamos aqui. Primeiramente, acredita-se que seja necessário avançar mais sobre trabalhos dessa natureza, para definir uma forma de avaliar os resultados obtidos de maneira automática e sistemática, que permita separar as soluções que de fato podem ser consideradas das que não seriam possíveis de ser aplicadas no realidade, por exemplo.

Seria necessário elaborar um sistema ou um método para aplicar às soluções que permitisse esse tipo de distinção. As possibilidades pensadas de maneira mais displicente até agora, que compartilhamos aqui, seriam: a) um sistema de filtragem, que não permitiria que as soluções inviáveis sequer surgissem como opções, deixando o usuário apenas com as que o código avaliasse como válidas; ou b) um sistema de notas, por exemplo, de 0 a 5, que deixaria claro para o usuário que aquela solução que o software está exibindo é considerada de baixa ou de alta qualidade, de acordo com os critérios utilizados para a avaliação. Claro, outras opções também poderiam surgir, visto que esse seria o próximo passo lógico para o avanço na elaboração dessa ferramenta.

Após a experimentação com o Plugin PlanFinder, que utilizamos para experimentar a geração de plantas a partir dos layouts que encontramos com o nosso código, pudemos observar que há inconsistência nos resultados. Isso torna o sistema como um todo ainda pouco confiável, e nem entrando no escopo sobre qualidade dos projetos, mas sobre a própria capacidade de gerar soluções, mesmo que ineficazes.

Com isso, podemos também refletir que, apesar de diariamente surgirem novas ferramentas, trazendo avanços da tecnologia para a Arquitetura e para os processos de projeto computacionais, de maneira geral ainda existe um caminho a ser percorrido, e muito estudo a ser feito sobre esse tema.

Uma ferramenta de estudos de viabilidade que organize os dados e os torne disponíveis de maneira integrada ao sistema das próximas etapas, como o Grasshopper, por exemplo, seria uma adição bem-vinda à lista que analisamos neste trabalho, e também uma boa forma de testar a fluidez do fluxo de projeto baseado em Grasshopper.

Claro, o Grasshopper e o Rhino são os mais citados aqui, por terem sido as plataformas sobre as quais trabalhamos, mas também por sua extensa e ativa

comunidade online, que sempre compartilha conhecimento, e pela abertura da McNeel, desenvolvedora do Rhino, que permite grande liberdade para essa comunidade criar suas próprias ferramentas adicionais para seus softwares.

Mas certamente não precisamos nos limitar a esse software, visto que o principal teor dos estudos aqui realizados – e de toda a pesquisa científica em geral – é sobre a lógica, o raciocínio por trás do processo. Desta forma, independentemente da plataforma, uma vez que for criado um fluxo que percorra todo esse trajeto (de estudar a viabilidade do projeto, gerar plantas de unidades habitacionais sem se apoiar em tipologias, e gerar o projeto de cada uma dessas unidades, incluindo ou não o layout de mobiliário), esse raciocínio será o que será seguido para atingir os novos objetivos e surgirem a essa altura.

Para finalizar, um aspecto que apareceu em algumas das ferramentas que analisamos aqui, e que tem sido responsável por uma série de discussões referentes a processos criativos nos últimos tempos, é a Inteligência Artificial (IA). Após a popularização do ChatGPT, criado pela empresa OpenAI, uma diversidade de ferramentas de IA voltadas para as mais variadas finalidades surgiu e se popularizou, desde ferramentas que geram imagens a partir de prompts a outras que simulam vozes e rostos de pessoas que podem ou não existir. E, claro, na área da AEC também tivemos ferramentas surgindo. E, com isso, pesquisas surgem a respeito do assunto. Geração de plantas a partir de IA, modelagem paramétrica a partir de prompts, renderização de imagens realistas a partir de esboços simples, etc.

Não surpreenderia nada se, literalmente amanhã, nos deparássemos com uma nova ferramenta baseada em IA que se propusesse a resolver todas as questões que tratamos aqui e, quiçá, indo além, visto que a tecnologia não para de evoluir.

REFERÊNCIAS

- ÁGUAS, S. **Do Design ao Co-Design**: uma oportunidade de design participativo na transformação do espaço público. *On the W@terfront*, Barcelona, v. 22, n. 1, p. 57-70, abr. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277163147_Do_design_ao_co-design_Uma_oportunidade_de_design_participativo_na_transformacao_do_espaco_publico. Acesso em: 18 nov. 2021.
- ANDRADE, M. L. V. X. de; RUSCHEL, R. C. Building Information Modeling (BIM). In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K., et al. **O processo de projeto em Arquitetura**: da teoria à tecnologia. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Cap. 21, p. 421-442.
- ARCHITECTURES. **Architectures**. 2021. Disponível em: <https://architectures.com/>. Acesso em: 29 nov. 2021.
- AUTODESK: **Generative design for architecture**, engineering & construction. Disponível em: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction>. Acesso em: 27 de nov. 2021.
- AVALONE, M. C.; FETTERMANN, D. de C. Demandas de customização em edifícios residenciais no Brasil: uma análise de agrupamentos empírico-qualitativa com base no sistema Skeleton/Infill. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 489–503, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200411>.
- CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287-300, 2020.
- CELANI, G.; FRAJNDLICH, R. U. de C. From prototypical to prototyping: mass-customization versus 20th century utopias in architecture and urban design. **PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 3, p. 160, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v7i3.8647348>.
- CELANI, G.; PUPO, R. T. Prototipagem rápida e fabricação digital para Arquitetura e construção: Definições e estado da arte no Brasil. **Cadernos de Pos-Graduação Em Arquitetura e Urbanismo**, v.8, n. 1, p. 31–41, 2008.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR., J. A. V. **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. 1ª. ed. Porto Alegre: Springer, 2015.
- EASTMAN, C. M.; EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM handbook**: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. Hoboken, Nova Jersey: Wiley, 2011.
- ELOY, S.; PAUWELS, P.; ECONOMOU, A. AI EDAM special issue: **advances in implemented shape grammars**: solutions and applications. *AI EDAM*, v. 32, n. 2, p. 131-137, 2018.

FINCH3D. **Finch3D**. Disponível em: www.finch3d.com. Acesso em: 14 de outubro de 2023

FRIEDMAN, A.; SPRECHER, A.; EID MOHAMED, B. A framework for developing design systems towards mass customization of housing. **International Journal of Architectonic, Spatial, and Environmental Design**, v. 6, n. 1, p. 57-69, 2013.

ISO/ASTM 52900. **Additive manufacturing, general principles, terminology**. ISO. Genebra, p. 20. 2015.

KENDALL, S. An Open Building Strategy for Achieving Dwelling Unit Autonomy in Multi-Unit Housing. **Housing and Society**, v. 31, n. 1, p. 89–102, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08882746.2004.11430500>.

KENDALL, S. **Four decades of open building: Realising Individual Agency in Architectural Design.**, v. 87(Issue 5), p.54–61.,2017.

KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and Design Democratization**. 1ª. ed. Nova York: Routledge, 2019.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. 1ª. ed. Nova York: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, B. Metadesigning customizable houses. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customizations and design democratization**. 1ª. ed. Abingdon: Routledge, 2019. Cap. 10, p. 117-128.

LARSEN, M. S. S.; LINDHARD, S. M.; BRUNOE, T. D.; NIELSEN, K.; LARSEN, J. K. **Mass customization in the house building industry: Literature review and research directions**. *Frontiers in Built Environment*, v. 5, p. 115, 2019.

MIYASAKA, E. L.; FABRICIO, M. M.; PAOLETTI, I. **Industry 4.0 and the Civil Construction in Brazil**. XXII congresso da sociedade. São Carlos: SIGraDi. 2018. p. 1-5.

MOM. **Arquitetura e participação: a caminho da produção de interfaces e não de espaços acabados**. 2021a. Disponível em: http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/10_arquitetos/quadro.htm. Acesso em: 23 nov. 2021.

MOM. **O que é a interface de espacialidade**. 2021b. Disponível em: http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/04_inter_espacial/autod.htm. Acesso em: 23 nov. 2021.

NABONI, R.; PAOLETTI, I. **Advanced Customization in Architectural Design and Construction**. 1ª. ed. New York: Springer, 2015.

OSPA PLACE APP. **Place**. Disponível em: www.app.ospa.place. Acesso em: 7 de outubro de 2023

PAOLETTI, I. Mass Customization in the Era of Industry 4.0: Towards Immaterial Building Technology. In: HEMMERLING, M.; COCCHIARELLA, L. **Informed Architecture: Computational Strategies in Architectural Design**. 1ª. ed. Cham: Springer , 2018. p. 77-87.

PAOLETTI, I.; CECCON, L. **The evolution of 3d printing in AEC**: From Experimental to Consolidated Techniques. In: CVETKOVIĆ, D. 3D Printing. 1ª. ed. [S.I.]: Intech Open, 2018. Cap. 3, p. 39-70.

PARAMETRIC SOLUTIONS. Disponível em: www.parametric.se/en. Acesso em: 14 de outubro de 2023.

PATEMAN, C. **Participation and Democratic Theory**. Melbourne: Cambridge University Press, 1970.

PILLER, F. T. Creating a sustainable mass customization business model. In: KOLAREVIC, B.; SUARTE, J. P. **Mass customization and design democratization**. Abington: Routledge, 2019. Cap. 3, p. 30 - 40.

PIROOZFAR, A. E.; LARSEN, O. P. **Customizing Building Envelopes**: Retrospects and Prospects of Customization in the Building Industry. In: PILLER, F. T.; TSENG, M. Handbook of Research in Mass Customization and Personalization. [S.I.]: World Scientific Publishing Company, v. I, 2009. Cap. 3, p. 869-891.

ROMÃO, C. A. de C. **O papel do arquiteto em processos participativos**: um contributo para a compreensão de alternativas no modo de projetar. 2015. 259 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/11236>.

SEGERSTEDT, A.; OLOFSSON, T. **Supply chains in the construction industry**. Supply Chain Management: An International Journal, v. 15, n. 5, p. 347–353, 2010. ISSN 1359-8546.

SHAPEDIVER. How it Works | **ShapeDiver**. 2021. Disponível em: <https://shapediver.com/how-it-works>.

SMITH, R. E. Mass Prefabrication: Investigating the Relationship Between Prefabrication and Mass Customization in Architecture. In: KOLAREVIC, B.; DUARTE, J. P. **Mass customization and Design Democratization**. 1ª. ed. Nova York: Routledge, 2019. Cap. 14, p. 175 -184.

SOUZA, M. P. de; IMAI, C.; AZUMA, M. H. Immersive virtual reality device to support the housing design process. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 22., 2018, São Carlos. **Proceedings** [...]. São Carlos: Blucher, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/immersive-virtual-reality-device-to-support-the-housing-design-process-29809>. Acesso em: 19 nov. 2021.

TAUBE, J.; HIROTA, E. H. Customização em massa no processo de provisão de Habitações de Interesse Social: um estudo de caso. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 253-268, out./dez. 2017. Associação Nacional de Tecnologia do **Ambiente Construído**. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212017000400253&script=sci_abstract&lng=pt.

VAN STRALEN, M. de S. Mass Customization: a critical perspective on parametric design, digital fabrication and design democratization, **XXII CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL**, Blucher Design Proceedings, Volume 5, 2018.

VELOSO, P.; CELANI, G.; SCHEEREN, R. From the generation of layouts to the production of construction documents: An application in the customization of apartment plans. **Automation in Construction**, v. 96, p. 224-235, 2018.

WALLGREN J. Website **Finch 3D** - Templates para download. Disponível em: <https://finch3d.com/>. Acesso em: 14 de outubro de 2020.

ZEVI, B. **Saber ver a Arquitetura**. 6. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2009

