



OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE CONSTRUÇÃO MODULAR COM O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

CAROLINE MINETTO

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

Orientadora: Bárbara Rangel Carvalho

JULHO DE 2024

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mprince@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Projeto Integrado na Construção do Edifício 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*.

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

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

Dedico este trabalho a todas as gerações de mulheres da minha família, especialmente, à minha sobrinha, Beatriz, que me faz acreditar e buscar por um futuro mais equitativo.

“Que nada nos defina. Que nada nos sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância”

Simone de Beauvoir

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha mãe, Maria do Carmo, por ser a base da minha formação, por me ensinar a importância dos estudos e por me mostrar que o mundo, com todas as suas possibilidades, cabe dentro do nosso potencial. Sua força, sabedoria e amor incondicional sempre me acompanharam, mesmo à distância.

Especialmente ao meu marido, Leonardo, meu parceiro de sonhos e meu maior incentivador. Sua paixão pelas novas tecnologias me inspirou a explorar novos horizontes e sua crença inabalável em mim me deu a força para enfrentar os desafios dessa jornada. Sua dedicação, índole e empatia, são inspiração. Obrigada por ser, junto ao Kenai, espaço de respiro.

À minha irmã, Jaqueline, por vibrar com cada conquista e por me encorajar a perseguir meus objetivos com entusiasmo. Seu amor e apoio incondicional foram essenciais para me manter motivada ao longo do caminho.

Ao meu irmão, Felipe pela calma nos momentos difíceis e por ser o pilar de força da nossa família, sua tranquilidade me permitiu a dedicação total nesse trabalho.

Aos meus sobrinhos, Beatriz e Pedro, que me inspiram a olhar o mundo de forma mais otimista.

As minhas sócias e amigas, Elis e Rochele, pela lealdade e parceria, por acreditarem em mim mesmo quando eu tive dúvidas, pelos conselhos e pela escuta. Saibam que sou honrada por dividir a profissão e a vida com vocês.

A minha orientadora, Arquiteta Bárbara Rangel, por ser inspiração como profissional e pessoa. Sua competência, dedicação e paixão pela construção me motivaram a buscar a excelência em meu trabalho. Agradeço por ter aceitado o desafio de me guiar durante o desenvolvimento desta pesquisa, por acreditar em meu potencial e por me proporcionar valiosas orientações que aprimoraram significativamente o meu trabalho.

Aos colegas e docentes que fizeram parte de toda minha trajetória acadêmica por compartilharem seus conhecimentos, experiências e amizade.

RESUMO

A dissertação explora a integração entre construção modular, a metodologia DfMA (Design for Manufacture and Assembly) e inteligência artificial (IA) com o intuito de otimizar projetos de construção. O objetivo central é alcançar melhorias significativas na eficiência, dentro do setor da construção civil.

A construção modular destaca-se pela sua capacidade de reduzir custos e tempo de execução, ao mesmo tempo que assegura elevados padrões de qualidade e sustentabilidade. Essa abordagem permite que componentes da construção sejam fabricados em ambientes controlados e posteriormente montados no local da obra, minimizando os impactos ambientais e as ineficiências típicas de construções tradicionais.

A metodologia DfMA complementa a construção modular ao focar no design de componentes que são fáceis de fabricar e montar. Isso resulta em processos mais enxutos e em uma redução significativa nos desperdícios de materiais e tempo.

A inclusão da IA na construção civil oferece um potencial disruptivo. Ferramentas e algoritmos de IA podem prever falhas, otimizar cronogramas e gerenciar recursos de forma mais precisa, levando a uma eficácia operacional sem precedentes. Além disso, a IA pode facilitar o design generativo, onde múltiplas iterações de um projeto podem ser avaliadas rapidamente para encontrar soluções ótimas que atendam a critérios específicos de sustentabilidade e performance.

No entanto, a adoção dessas tecnologias não está isenta de desafios. A dissertação aborda diversas barreiras técnicas, econômicas e culturais que dificultam a implementação em larga escala dessas inovações. Entre os desafios técnicos estão a integração de sistemas heterogêneos e a necessidade de padronização de componentes modulares. Do ponto de vista econômico, os altos custos iniciais de adoção e a curva de aprendizagem são obstáculos significativos. Culturalmente, a resistência ao abandono de métodos tradicionais em favor de abordagens inovadoras ainda é um peso a ser superado.

A investigação inclui uma revisão abrangente da literatura sobre os três principais tópicos: construção modular, DfMA e IA. Foram consultados diversos artigos científicos e estudos disponíveis em bancos de dados como Scopus e Google Scholar para uma análise aprofundada e atualizada.

A tese propõe uma estratégia de otimização de projeto de construção modular a partir de um modelo paramétrico, desenvolvido nos softwares Grasshopper-Rhinoceros-Archicad. De modo a sistematizar o processo, criando maior agilidade e interação, e o desenvolvimento do projeto, através de uma interface entre a parametrização e o BIM.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência Artificial, Construção Modular, DfMA, Design Paramétrico, Industrialização

ABSTRACT

The dissertation explores the integration of modular construction, the DfMA (Design for Manufacture and Assembly) methodology and artificial intelligence (AI) in order to optimize construction projects. The central aim is to achieve significant improvements in efficiency within the construction sector.

Modular construction stands out for its ability to reduce costs and execution time, while ensuring high standards of quality and sustainability. This approach allows building components to be manufactured in controlled environments and then assembled on-site, minimizing the environmental impacts and inefficiencies typical of traditional construction.

The DfMA methodology complements modular construction by focussing on the design of components that are easy to manufacture and assemble. This results in leaner processes and a significant reduction in wasted materials and time.

The inclusion of AI in construction offers disruptive potential. AI tools and algorithms can predict sickness, optimize schedules and manage resources more precisely, leading to unprecedented operational efficiency. In addition, AI can facilitate generative design, where multiple iterations of a project can be evaluated quickly to find optimal solutions that meet specific sustainability and performance criteria.

However, the adoption of these technologies is not without its challenges. The dissertation addresses various technical, economic and cultural barriers that hinder the large-scale implementation of these innovations. Among the technical challenges are the integration of heterogeneous systems and the need to standardize modular components. From an economic point of view, the high initial costs of adoption and the learning curve are significant obstacles. Culturally, resistance to abandoning traditional methods in favor of innovative approaches is still a burden to overcome.

The research includes a comprehensive literature review on three main topics: modular construction, DfMA and AI. Various scientific articles and studies available on databases such as Scopus and Google Scholar were consulted for an in-depth and up-to-date analysis.

The thesis proposes an optimisation strategy for modular construction projects based on a parametric model, developed using Grasshopper-Rhinoceros-Archicad software. To systematize the process, creating greater agility and interaction, and the development of the project, through an interface between parameterisation and BIM. **KEYWORDS:** Artificial Intelligence, Modular Construction, DfMA, Parametric Design, Industrialization.

KEYWORDS: Artificial Intelligence, Modular Construction, DfMA, Parametric Design, Industrialisation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONTEXTO..... 1

1.1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO DA DISSERTAÇÃO 1

1.1.2. PERTINÊNCIA DO ESTUDO 2

1.1.3. PROBLEMA DA PESQUISA 3

1.2. OBJETIVOS..... 3

1.3. METODOLOGIA 4

1.3.1. METODOLOGIA DA PESQUISA 4

1.3.2. IDENTIFICAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE 4

1.3.3. EXTRAÇÃO DE DADOS..... 5

1.3.4. SÍNTESE DE DADOS 5

2. ESTADO DA ARTE..... 7

2.1. INTRODUÇÃO 7

2.2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA..... 8

2.2.1. CONSTRUÇÃO MODULAR 8

2.2.2. DFMA – DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY 12

2.2.3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 19

3. ESTUDO DE CASO	30
3.1. INTRODUÇÃO	30
3.2. ENQUADRAMENTO DO PROJETO.....	30
3.2.1. DESIGN PARAMÉTRICO	30
3.2.2. PROJETO.....	42
3.3. METODOLOGIA	42
3.4. PLANO EXPERIMENTAL	46
3.5. PARÂMETROS DE PROJETO	47
3.5.1. MÉTODO CONSTRUTIVO	48
3.5.2. TRANSPORTE E LOGÍSTICA	50
3.5.3. ELEMENTOS E FORMATOS - MÓDULOS, COMPONENTES E ELEMENTOS DO SISTEMA	51
3.5.4. O PROBLEMA DOS CANTOS	51
3.5.5. JUNTAS	52
3.5.6. MÓDULO DE SERVIÇO.....	53
3.6. MODELO PARAMÉTRICO	54
3.6.1. ARCHICAD	54
3.6.2. GRASSHOPPER	57
3.6.3. ARCHICAD-GRASSHOPPER-ARCHICAD	68
3.7. DOCUMENTAÇÃO	73
3.8. APLICAÇÃO DE FERRAMENTA DE IA EXISTENTE.....	73
3.8.1 ZENERATE.....	73
4. CONCLUSÃO	80
4.1. CONCLUSÃO GERAL.....	80

4.2. CONCLUSÃO DO PROJETO	81
4.3. REPERCUSSÕES FUTURAS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
5. ANEXOS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Combinações resultantes	5
Figura 2 - Methodi Ordinatio.....	5
Figura 3 - Análise final, com as publicações selecionas.....	6
Figura 4 - Unidade Modular de um Edifício Fonte: Thai, 2020	8
Figura 5 - Relação tempo de Montagem em obra x Tempo de produção off-site. Fonte: Autora	10
Figura 6 - Fases de um processo de DfMA Fonte: Gao 2019	14
Figura 7 – DfMA Overlay to Plan of Work Fonte: RIBA	16
Figura 8 - Transição de uma construção convencional para uma construção industrializada. Fonte: (Baduge, 2022)	20
Figura 9 - Subdivisões da AI Fonte: Ramona, 2022	21
Figura 10 - Pesquisa sobre o uso da IA nas diversas fases do projeto. Fonte: RIBA	23
Figura 11 - Áreas de aplicação da IA no setor da indústria 4.0 Fonte: Baduge, 2022	24
Figura 12 - Oportunidades e Desafios da IA na construção Fonte: Ragona 2022	26
Figura 13 - Zenerate Modular.....	27
Figura 14 - Análise de impacto ambiental do projeto Phoenix no Autodesk Forma Fonte: RIBA	28
Figura 15 - O fluxo de trabalho para um conceito de projeto paramétrico até a fabricação. (Khamis, 2022)	37
Figura 16 - Exemplo de fluxograma de Projeto Paramétrico para construção modular. Fonte: Autora	40
Figura 17 - Criação de objeto GDL no PARAM-O Fonte: Autora	44
Figura 18 - Interface entre Grasshopper e Rhinoceros Fonte: Autora.....	45
Figura 19 - Exemplo de aplicação da gramática da forma para quadrados inscritos. Fonte:(Nguyen, at 2019)	46
Figura 20 - Processo de Desenvolvimento do Modelo Paramétrico Fonte: A autora.....	47
Figura 21 - Parâmetros de projeto pré-fabricado Fonte: Dorries and Zahradnik, 2019.....	48

Figura 22 - Quatro métodos apresentados quando a construção modular. Fonte:(Dorries et. al, 2019)	49
Figura 23 - Microapartamentos executados em aço, edifício residencial Carmel em NY. Fonte: Escritório NYC Mavor, retirado do livro(Dorries et. al, 2019)	50
Figura 24 - Catálogo das variações dos elementos de um edifício. Fonte: (Dorries et. al, 2019).	51
Figura 25 - Exemplos de soluções para os cantos. Fonte:(Dorries and Zahradnik 2019).....	52
Figura 26 - Exemplo de Juntas aparente na Fachada Fonte: (Dorries et al, 2019).....	52
Figura 27 - Instalações alinhadas verticalmente Fonte:(Dorries et. al, 2019)	53
Figura 28 - Definição do Perfil Viga no Archicad Fonte: Autora	54
Figura 29 - Criação de Objeto no PARAM-O Fonte: Autora	55
Figura 30 - Parametrização do Objeto GDL Fonte: Autora.....	55
Figura 31 - Resultado do objeto paramétrico, baseado nas escolhas. Fonte: Autora.....	56
Figura 32 - Algoritmo Generativo completo. Fonte: Autora	57
Figura 33 - Função e dimensionamento dos módulos. Fonte: Autora	58
Figura 34 - Representação modular do vocabulário da Gramática da Forma. Fonte: Autora....	58
Figura 35 – Destaque 01 - Cluster de modelagem Geométrica	59
Figura 36 - Interior do Cluster Módulo Úmido. Fonte: Autora	59
Figura 37 – Destaque 02 - Regras da Gramática da Forma Fonte: Autora.....	61
Figura 38 - Condicionante por colisão Fonte: Autora.....	62
Figura 39 – Destaque 03 - Detalhe da utilização do SmartAttribute Fonte: Autora	63
Figura 40 - Destaque 04 Geração de iterações. Fonte: Autora	64
Figura 41 - Diagrama das diversas áreas da Inteligência Artificial Fonte: (Li, 2018)	65
Figura 42 - Genótipo e Fenótipo Fonte: Natole, 2019	66
Figura 43 - Destaque 05 - Algoritmo Genético de Otimização	66
Figura 44 - Configuração da Função Fitness. Fonte: Autora	67

Figura 45 - Execução do Galapagos. Fonte: Autora.....	67
Figura 46 – Amostragem da geração automática e aleatória do Edifício. Fonte: Autora	68
Figura 47 - Grasshopper-Archicad Live Connection. a)No Archicad b) No Grasshopper. Fonte: Autora	69
Figura 48 - Modelagem dos componentes Archicad no Grasshopper. Fonte: Autora.....	69
Figura 49 - Acesso Biblioteca Archicad, pelo Grasshopper	70
Figura 50 - Comparação entre modelo Grasshopper e Archicad. Fonte: Autora	70
Figura 51 - Templates nativos do software Solibri. Fonte: Autora	71
Figura 52 - Conexão Archicad-Solibri Fonte: Autora	72
Figura 53 – Recorte de Relatório e Análise pelo Solibri ao modelo IFC. Fonte: Autora.....	72
Figura 54 - Interface online Zenerate.modular. Fonte: Zenerate	74
Figura 55 - Definição da localização Fonte: Autora	75
Figura 56 - Criação do módulo Fonte: Autora.....	75
Figura 57 - Definições do Terreno Fonte: Autora.....	75
Figura 58 - Definição dos módulos tipos. Fonte: Autora.....	76
Figura 59 - Seleção dos módulos a serem utilizados. Fonte: Autora	76
Figura 60 - Ajustes finais quanto a composição do edifício. Fonte: Autora	77
Figura 61 - Opções Geradas a partir dos inputs apresentados. Fonte: Autora	77
Figura 62 - Comparação de duas opções escolhidas. Fonte: Autora.....	78
Figura 63 - Análise de Layout e Orientação das Fachadas, Fonte: Autora	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Recorte de quadro resumo. Fonte: Autora	6
Tabela 2 - Tipos de sistema modular básico. Fonte: Adaptado pela autora de (Huang, 2007) .	9
Tabela 3 - Empresas e principais aplicações da IA. Fonte: Autora	28
Tabela 4 - Principais Softwares e Ferramentas. Fonte: Autora	39
Tabela 5 - Mapeamento de variações do componente Fachada. Fonte: Autora.....	56
Tabela 6 - Esquema demonstrando os Componentes, Elementos e Módulos do Sistema. Fonte: Autora	57
Tabela 7 - Regras da Gramática da Forma Fonte: Autora	61
Tabela 8 - Conectores de módulos Fonte: Autora	64
Tabela 9 - Tabela Quantitativa de Componentes e Módulos Archicad. Fonte: Autora.....	73

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AG – Algoritmos Genéticos

BIM - Building Information Modeling (Modelagem da Informação da Construção)

CM – Construção Modular

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DfMA – Design for Manufacture and Assembly

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IA – Inteligência Artificial

IPD - Integrated Project Delivery (Entrega Integrada de Projeto)

MPRINCE - Mestrado Integrado na Construção de Edifícios

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

1.1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO DA DISSERTAÇÃO

Acredita-se que o setor da construção é uma das indústrias com maior resistência e atraso quanto ao avanço de novas tecnologias, sua empregabilidade e a dificuldade de se enquadrar na Indústria 4.0 (Bassir, 2023). Paralelo a isso, uma crescente busca de soluções eficientes, sustentáveis e de qualidade confronta a indústria para soluções mais econômicas e rápidas, obrigando a repensar metodologias e tecnologias já utilizadas e novas, no setor da construção. A utilização de componentes pré-fabricados e processos padronizados aumentam à medida que conceitos da construção modular e do Design for Manufacture and Assembly (DfMA) tomam ainda mais forma, apresentando-se como respostas para os problemas de falta de mão de obra e custos elevados de materiais. Essa industrialização da construção melhora a eficiência e o controle de qualidade, ao mesmo tempo que reduzem o desperdício. Enquanto processos padronizados agilizam a construção, minimizando erros e otimizando o uso de materiais, criando um ambiente de construção mais semelhante ao de uma fábrica, levando a maior eficiência, previsibilidade e qualidade. Porém ainda é percebida uma resistência quanto ao edifício como produto, e sua singularidade quanto ao contexto, em particular junto dos projetistas e dos usuários.

No entanto, essa resistência vem gradualmente sendo desafiada pelo surgimento e pela adoção de tecnologias mais avançadas, como a inteligência artificial (IA). A IA tem o potencial de transformar ainda mais a indústria da construção, oferecendo uma abordagem dinâmica à padronização, além de trazer um equilíbrio entre a eficiência dos processos industrializados e a personalização dos componentes. Os algoritmos de IA podem analisar grandes volumes de dados para identificar as melhores práticas de construção, sugerindo layouts eficientes e personalizados com base nas especificações do projeto.

Enquanto encontramos equilíbrio entre padronização e construção, frente a uso da metodologia do DfMA como industrialização do produto, avançamos para tecnologias da inteligência artificial (IA), oferecendo uma abordagem mais dinâmica à padronização. Enquanto os algoritmos de IA podem analisar grandes quantidades de dados de construção para identificar maneiras ideais de

padronizar processos e personalizar componentes dentro de determinados parâmetros (por exemplo, sugerindo o layout mais eficiente para unidades pré-fabricadas com base nas especificações do projeto) (Rankohi, 2022), (Laovisutthichai, 2022). Isto permite um equilíbrio entre a padronização para eficiência e algum nível de personalização para as necessidades do projeto. Tais tecnologias, que se apresentam desde a etapa de concepção do projeto até o gerenciamento e fiscalização das obras, já são utilizadas de modo empírico. A utilização e disseminação do BIM, juntamente à automação e robótica, ainda que em níveis mais indústrias abrem espaço avançarmos com tecnologias ainda resistentes.

No contexto do projeto para construção, a discussão se estabelece entre o limite legal e a propriedade criativa, ao tempo que em soluções padronizadas, ganha-se espaço para o uso mais livre da máquina como ferramenta de tomada de decisão. Os projetos gerados por IA levantam questões sobre quem possui a propriedade intelectual: É o arquiteto que orienta a IA, o programador que criou a IA ou a própria IA? Os atuais quadros jurídicos poderão necessitar de ajustes para abordar a propriedade de projetos gerados por IA, levanta ainda a preocupação de que a IA possa limitar a liberdade criativa dos arquitetos, no entanto, soluções padronizadas podem, na verdade, criar mais espaço para a criatividade humana, ao lidar com tarefas repetitivas e sugerir soluções otimizadas, liberando os arquitetos para se concentrarem nos aspectos mais conceituais e artísticos do design. O uso de componentes pré-fabricados ou elementos de design estabelecidos permite que a IA se concentre na otimização de seu arranjo e integração dentro do design, soluções padronizadas estabelecem uma estrutura dentro da qual a IA pode operar como uma poderosa ferramenta de tomada de decisão (Abd Razak, 2022), com o arquiteto definindo os parâmetros e objetivos do projeto, e a IA sugerindo soluções que atendam tanto à visão criativa quanto aos padrões estabelecidos.

Essa dissertação busca, a integração da construção modular, como industrialização, o DfMA como metodologia de minimização de peças e conexões e a IA como análise e apoio a decisões de projeto requerido.

1.1.2. PERTINÊNCIA DO ESTUDO

Tal como expressado anteriormente, acredita-se na potencialização de duas áreas em crescimento: A IA e construção modular com o uso da metodologia do DfMA, aproximando assim, das metodologias adotadas na indústria corrente.

A integração da inteligência artificial (IA) na construção modular tem um potencial significativo, particularmente na gestão de riscos, planejamento de projetos e gestão de ativos. (Pillai, 2021) destaca a importância da IA na identificação e mitigação de riscos, com ênfase ao papel do aprendizado de máquina e da lógica difusa neste processo. (Regona, 2022) reforça ainda os benefícios da IA no planejamento e gestão de projetos, particularmente na redução de tarefas repetitivas e na melhoria dos processos de trabalho.

A construção civil é uma das indústrias mais ineficientes em termos de uso de recursos, a integração das áreas tem o potencial de melhorar a eficiência em todo o ciclo de vida do projeto, desde o design até a montagem. Tais otimizações refletem-se na sustentabilidade, redução de

custos, avanços tecnológicos e a interdisciplinaridade, que pode abrir novas oportunidades de pesquisar e promover a colaboração entre diferentes campuses.

1.1.3. PROBLEMA DA PESQUISA

A dissertação busca responder “Como a integração da inteligência artificial, baseada na metodologia DfMA, pode otimizar o projeto com base em construção modular industrializada?”.

Enquanto o DfMA oferece uma abordagem estruturada, considerando a capacidade de fabricação e montagem, a IA, pode melhorar significativamente a otimização do projeto de construção modular industrializada, através do Design generativo (Seff, 2021), análises preditivas, automatização. Tal integração, pode reduzir o tempo de projeto, aumentar a eficiência e qualidade, com padronização e escalabilidade.

Na procura por respostas, a busca por entender os princípios e objetivos da construção modular e da metodologia DfMA, centrada não apenas na construção, como na indústria, alinhando a busca pelo mapeamento das tecnologias já utilizadas e nas potências tecnológicas de apoio ao projeto e construção, contextualizou a direção da tese.

O DfMA define uma abordagem estruturada para o projeto modular, considerando desde a concepção até a fabricação e montagem.

Software BIM (Building Information Modeling), é uma plataforma digital que integra informações sobre o projeto em um único modelo 3D, permitindo a criação de modelos paramétricos de componentes modulares. Ferramentas como Autodesk Revit e Graphisoft Archicad são exemplos populares. (Alwisy, 2019), (Lu, 2020).

Software de Modelagem Paramétrica Dedicada, ferramentas como Rhino 3D, Grasshopper e Dynamo permitem a criação de modelos paramétricos complexos com maior flexibilidade e controle. (Baltus & Žebrauskas, 2019), (Fuchkina, et al., 2018).

A IA pode auxiliar os arquitetos na concepção modular de diversas maneiras, como algoritmos de Geração Generativa que podem gerar automaticamente diversas variações de design modular que atendem aos requisitos do projeto. (Keshavarzi, et al., 2020), (Seff, 2021). E algoritmos de otimização podem ajustar automaticamente os parâmetros do modelo modular para otimizar o projeto em relação a diversos critérios. (Banihashemi, et al., 2018), (Frangedaki, et al., 2022).

1.2. OBJETIVOS

Estabeleceu-se então que o objetivo central desta dissertação seria: o mapeamento do uso da Inteligência artificial na construção modular, bem como as diretrizes de projeto e metodologia DfMA, com foco na melhoria e otimização de padrões detectados.

Em suma, esta dissertação explora as aplicações e potenciais benefícios da IA incluindo deep learning, machine learning e redes neurais, na otimização de processos de construção, proporcionar uma compreensão abrangente das interseções entre construção modular, DfMA e IA identificando lacunas na literatura existente;

Tendo em consideração a amplitude do objetivo geral, considerou-se necessário afinar o objeto de pesquisa.

- Identificar e analisar as principais áreas de aplicação de IA em projeto de construção civil, destacando casos de sucesso e desafios específicos;
- Analisar os requisitos específicos e as características distintivas do setor de construção modular que podem ser otimizados por meio da implementação de técnicas de IA;
- Proporcionar uma análise crítica das barreiras existentes para a adoção de soluções baseadas em IA na construção modular, incluindo fatores técnicos, econômicos e culturais;
- Propor estratégias e diretrizes para superar desafios identificados e facilitar a implementação bem-sucedida de soluções baseadas em IA na construção modular;
- Validar os resultados e conclusões por meio de estudos de caso práticos, aplicando os conceitos desenvolvidos a projetos reais de construção modular

1.3. METODOLOGIA

1.3.1. METODOLOGIA DA PESQUISA

Essa pesquisa seguiu a metodologia de revisão da literatura como uma abordagem que busca a aprimoração de conhecimento de três conceitos fundamentais para a dissertação, a construção modular, o DfMA e a IA, desenvolvidos para o Estado da Arte.

A identificação da literatura, consistiu na identificação, seleção e análise de estudos relevantes sobre o tema. Para isso foi realizado um enquadramento na relação conceitual e temporal dos temas.

A pesquisa utilizou os bancos de dados Scopus, Google Scholar e Web of Science para coletar artigos de pesquisa acadêmicos publicados nos últimos 5 anos, onde continham pelo menos um dos termos identificados no título, resumo ou palavra-chave, onde os temas foram buscados separadamente, mas também com interface entre eles.

O resultado foram 5652 registros, que após uma nova triagem retirando os que não apresentavam “modular construction” OR “construction” resultou em 1201 registro.

1.3.2. IDENTIFICAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE

Para a identificação das palavras-chave, foi selecionado manualmente alguns artigos considerados relevantes e sintetizados dentro do VosViewer, para a identificação de outras possíveis variações. As palavras-chave principais foram *Artificial Intelligence*, *Modular Construction* e *Design for Manufacture and Assembly(DfMA)* . Com essa primeira análise, foram acrescentadas as variações de suas palavras: *Deep Learning*; *Machine Learning*; *Neural Networks*; *Industrialization*; *Modular design*; *Construction Optimization*; *Project Optimization*;

As combinações que tiveram resultados estão mostradas no quadro abaixo:

"artificial intelligence" AND "modular construction" AND ("design for manufacture and assembly" OR dfma)
 "modular construction" AND ("deep learning" OR "machine learning" OR "neural networks")
 "artificial intelligence" AND "modular construction" AND (bim OR "building information modeling") AND industrialization
 "artificial intelligence" AND "modular construction" AND ("Project Optimization" OR "Construction Optimization")
 "artificial intelligence" AND "modular construction" AND ("building information modeling" OR bim) AND ("Project Optimization" OR "Construction Optimization")
 "artificial intelligence" AND "modular construction" AND project
 "artificial intelligence" and (DFMA OR "design for manufacture and assembly")
 "Modular Construction" and (DFMA OR "design for manufacture and assembly")

Figura 1 - Combinações resultantes

1.3.3. EXTRAÇÃO DE DADOS

Posteriormente, os 1201 registros foram triados retirando artigos duplicados e publicações que continham palavras relacionadas, mas abordavam temas de área diferentes (Ex. Medicina na utilização da IA e modularização).

O Resultado foram 607 publicações de cunho inicial relevantes, de onde foram analisados e categorizados novamente, com a utilização do método ordinatio, a partir de qual foi considerado o fator de impacto do jornal publicado, número de citações, ano de publicação e um valor alfa para importância do ano de publicação (Aqui atribuído 8, uma vez que as tecnologias estão em constante avanço), como demonstrado abaixo:

Construção Modular							
Articles on technology transfer model (autor, year, journal)	Impact factor (phase 6)	Citations (phase 6)	Year (phase 6)	ALFA	ANO ATUAL	InOrdinatio (phase 7)	
Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A.C., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-story modular buildings - A state-of-the-art review. <i>Engineering Structures</i> .	5,5	318	2019	8	2024	358,0	
Thai, H., Ngo, T.D., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. <i>Structures</i> , 28, 1265-1290.	4,1	140	2020	8	2024	188,0	
Xu, Z., Zayed, T.M., & Niu, Y. (2020). Comparative analysis of modular construction practices in mainland China, Hong Kong and Singapore. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 245, 118861.	11,1	131	2020	8	2024	179,0	
Wang, M., Wang, C., Sepasgarat, S.M., & Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0 Buildings.	3,8	129	2020	8	2024	177,0	
Froh, M.W., & Goh, Y. (2019). Lean production theory-based simulation of modular construction processes. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	122	2019	8	2024	162,0	
Liew, J.Y., Chau, Z., & Chua, Y.S. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings.	3,8	123	2018	8	2024	155,0	
Parkeenan, M., Fennel, A.E., Shajati, A., Hakim, H., & Kibert, C.J. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. <i>Journal of building engineering</i> , 29, 101138.	6,4	88	2020	8	2024	136,0	
Kamali, M., Hewage, K.N., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative evaluation of LCA for residential buildings. <i>Energy and Buildings</i> , 204, 109479.	6,7	93	2019	8	2024	133,0	
Inella, F., Azadpour, M., & Bai, Y. (2019). Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> , 145, 04019076.	3,1	92	2019	8	2024	132,0	
L.M. (2023). Investigation of the Severity of Modular Construction Adoption Barriers with Large-Scale Group Decision Making in an Organization from Internal and External Stakeholder Perspectives. <i>Computer Modeling in Engineering & Sciences</i> .	2,4	60	2023	8	2024	132,0	
L.I.X., L.W., X.W., W.L., Zhao, R., Lou, J., & Xu, J. (2022). Blockchain-Enabled IoT-BIM Platform for Supply Chain Management in Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	64	2022	8	2024	128,0	
Choi, J.O., Chen, X., & Kim, T.W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 105-93.	3,9	87	2019	8	2024	127,0	
L.I.X., W.L., Zhao, R., Lu, W., & Xue, F. (2021). Two-layer Adaptive Blockchain-based Supervision model for off-site modular housing production. <i>Comput. Ind.</i> , 128, 103437.	1,99	64	2021	8	2024	120,0	
Hsu, P., Autsichio, M., & Angeloudis, P. (2019). Risk-averse supply chain for modular construction projects. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	64	2019	8	2024	108,0	
Abdul Nabil, M., & Eladaway, J.H. (2020). Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	55	2020	8	2024	103,0	
Yang, Y., Pan, M., Pan, W., & Zhang, Z. (2021). Sources of Uncertainties in Offsite Logistics of Modular Construction for High-Rise Building Projects. <i>Journal of Management in Engineering</i> , 37, 04021011.	7,4	45	2021	8	2024	101,0	
Zheng, Z., Zhang, Z., & Pan, W. (2020). Virtual prototyping- and transfer learning-enabled module detection for modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> , 120, 103367.	10,3	44	2021	8	2024	100,0	
Yang, Y., Pan, M., & Pan, W. (2019). Co-evolution through interaction of innovative building technologies: The case of modular integrated construction and robotics. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	59	2019	8	2024	99,0	
Jeong, G., Kim, H., Lee, H., Park, M., & Hyun, H. (2021). Analysis of safety risk factors of modular construction to identify accident trends. <i>Journal of Asian Architecture and Building Engineering</i> , 21, 1040-1052.	1,5	41	2021	8	2024	97,0	
Ali, A.H., Kineber, A.F., Elhamany, A.H., Ibrahim, A.H., & Dawoud, A.O. (2023). Modelling the role of modular Construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects. <i>Journal of Building Engineering</i> .	6,4	24	2023	8	2024	96,0	
Ali, A.H., Elhamany, A.H., Ibrahim, A.H., Kineber, A.F., & Dawoud, A.O. (2023). Modelling the relationship between modular construction adoption and critical success factors for residential projects in developing countries. <i>International Journal of Construction Management</i> , 24, 1314-1325.	3,9	23	2023	8	2024	93,0	
Wu, L., Lu, W., Zhao, R., Xu, J., Li, X., & Xue, F. (2022). Using Blockchain to Improve Information Sharing Accuracy in the Onsite Assembly of Modular Construction. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	30	2022	8	2024	94,0	

Figura 2 - Methodi Ordinatio

1.3.4. SÍNTESE DE DADOS

Os 25 artigos de maior relevância de cada tema, foram selecionados e foi feito uma nova análise das palavras-chave, a fim de compor e definir as palavras-chave do tema (Figura 3).

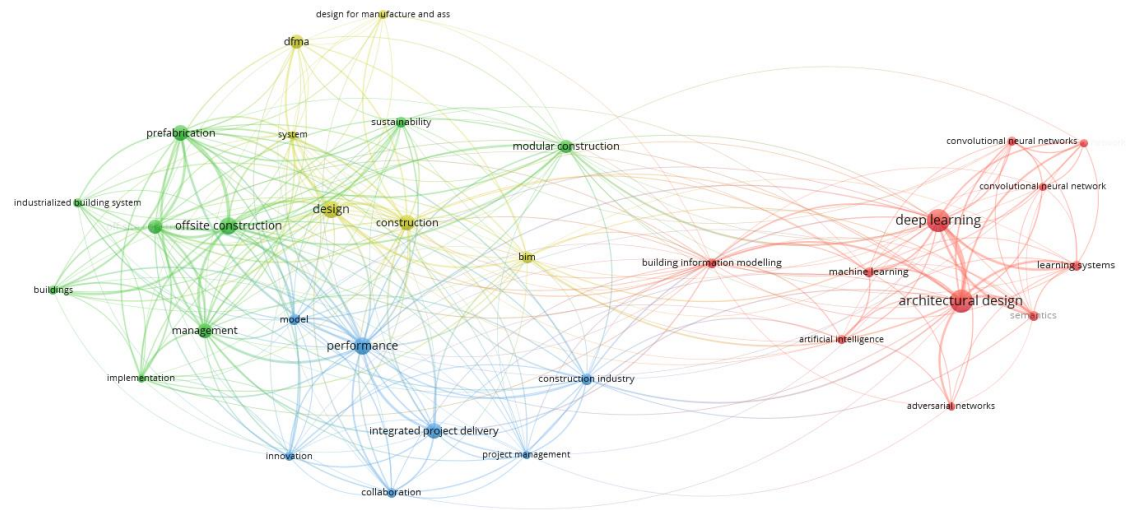


Figura 3 - Análise final, com as publicações selecionadas

De modo a combinar e organizar os dados extraídos para responder as questões propostas da pesquisa, foram organizados quadros resumos (Tabela 1), detalhando as contribuições gerais e específicas de cada publicação.

CONSTRUÇÃO MODULAR		
Artigo	Principal contribuição	Contribuições específicas
Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A.C., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. <i>Engineering Structures</i> , 186, 1095-1129.	Revisão abrangente sobre edifícios modulares de vários andares	Identifica avanços, desafios e oportunidades; análise de diferentes tipos de sistemas modulares.
Thai, H., Ngo, T.D., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. <i>Structures</i> , 28, 1265-1290.	Revisão sobre a construção modular para edifícios altos	Análise características, desafios e tendências da construção modular em edifícios altos.
Xu, Z., Zayed, T.M., & Niu, Y. (2020). Comparative analysis of modular construction practices in mainland China, Hong Kong and Singapore. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 245, 118861.	Análise comparativa das práticas de construção modular	Análise práticas em China, Hong Kong e Singapura, identificando diferenças e similaridades.
Wang, M., Wang, C., Sepasgozar, S.M., & Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. <i>Buildings</i> .	Revisão sobre adoção de tecnologias digitais na construção modular	Análise tecnologias digitais adotadas na construção off-site e sua relação com a Indústria 4.0.
Goh, M.W., & Goh, Y. (2019). Lean production theory-based simulation of modular construction processes. <i>Automation in Construction</i> .	Simulação de processos de construção modular	Simula processos modulares utilizando princípios Lean, identificando gargalos e oportunidades de melhoria.
Liew, J.Y., Dai, Z., & Chua, Y.S. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings.	Sistemas compostos de aço e concreto para construção modular	Estuda sistemas estruturais mistos para edifícios modulares altos.
Razienari, M., Fenner, A.E., Shojaei, A., Hakim, H., & Kibert, C.J. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. <i>Journal of building engineering</i> , 29, 101138.	Percepções sobre a construção modular nos EUA	Análise percepções de stakeholders sobre a construção off-site.
Kamali, M., Hewage, K.N., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. <i>Energy and Buildings</i> , 204, 109479.	Análise do ciclo de vida de métodos de construção convencionais e modulares	Realiza análise de ciclo de vida (LCA) comparativa entre os dois sistemas construtivos.
Innella, F., Asanpour, M., & Bai, Y. (2019). Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. <i>Journal of Construction Engineering and Management-asc</i> , 145, 04019076.	Revisão de metodologias Lean para construção modular	Análise a aplicação de princípios Lean na construção modular.
Li, M. (2023). Investigation of the Severity of Modular Construction Adoption Barriers with Large-Scale Group Decision Making in an Organization from Internal and External Stakeholder Perspectives. <i>Computer Modeling in Engineering & Science</i> .	Análise de barreiras à adoção da construção modular	Identifica barreiras internas e externas à adoção da construção modular em organizações.
Li, X., Lu, W., Xue, F., Wu, L., Zhao, R., Lou, J., & Xu, J. (2022). Blockchain-Enabled IoT-BIM Platform for Supply Chain Management in Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	Plataforma IoT-BIM baseada em blockchain para gestão da cadeia de suprimentos	Proposta de uma plataforma integrada para gestão da cadeia de suprimentos em construção modular.
Choi, J.O., Chen, X., & Kim, T.W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 105 - 93.	Oportunidades e desafios de métodos modulares em ambientes urbanos densos	Análise o potencial da construção modular em áreas urbanas, considerando desafios como transporte e logística.
Li, X., Wu, L., Zhao, R., Lu, W., & Xue, F. (2021). Two-layer Adaptive Blockchain-based Supervision model for off-site modular housing production. <i>Comput. Ind.</i> , 128, 103437.	Modelo de supervisão adaptativo baseado em blockchain para produção de habitação modular	Proposta de um modelo de supervisão para garantir a qualidade e rastreabilidade na produção de módulos.
Hsu, P., Aurisicchio, M., & Angeloudis, P. (2019). Risk-averse supply chain for modular construction projects. <i>Automation in Construction</i> .	Cadeia de suprimentos resistente a riscos para projetos de construção modular	Propõe uma cadeia de suprimentos resiliente para mitigar riscos em projetos modulares.
Abdul Nabi, M., & El-adawy, I.H. (2020). Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	Fatores de decisão e necessidades de pesquisa futura na construção modular	Identifica fatores críticos de sucesso para a implementação da construção modular.

Tabela 1 - Recorte de quadro resumo. Fonte: Autora

2

ESTADO DA ARTE

Nesse segundo capítulo, será apresentado o Estado da Arte, através de uma revisão da literatura, dos temas centrais da tese, desenvolvidos no subcapítulo: 2.2 Revisão Bibliométrica.

Organiza-se dessa forma, a definição, contextualização, princípios, objetivos e desafios de cada um dos temas, divididos em: 2.2.1 Construção Modular; 2.2.2 DfMA – Design for Manufacture and Assembly; 2.2.3 Inteligência Artificial.

2.1. INTRODUÇÃO

A construção modular, uma das vertentes da construção off-site, tem como princípio o controle e qualidade (Alfieri et al. 2020) adquiridos em âmbito de fábrica. Alinhando organização e gestão e metodologia do *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA), é possível ter um maior rigor na produtividade, maximizando a eficiência e reduzindo tempo e custo (Banihashemi et al., 2018).

Reforçando a ideia do edifício como produto, e do produto como um conjunto de módulos, componentes e elementos, a IA é usada, de diversas maneiras, para principalmente analisar e apoiar a tomada de decisões, diminuindo os riscos e eventuais falhas decorrentes do processo tradicional.

Assim como na indústria corrente, é necessário implementar a Inteligência Artificial na Indústria da Construção como forma de otimizar os processos (Abd Razak, 2022), de produção e a integração entre projeto e fabricação. Devido ao fato de a Construção envolver produtos de grande escala e alta complexidade, a utilização da IA pode facilitar a sistematização de processos e a organização da comunicação (Banks et al., 2018) entre os diversos agentes envolvidos, como projetistas, construtores e fabricantes.

Torna-se então, evidente a necessidade de explorar de forma mais aprofundada os conhecimentos existentes e inovadores no campo da Inteligência Artificial aplicada à construção civil. A revisão bibliométrica servirá como uma base sólida para identificar as principais tendências, desafios e oportunidades na integração dessas tecnologias, permitindo uma análise detalhada e fundamentos teóricos que embasarão a discussão subsequente dos conceitos relevantes.

2.2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

2.2.1. CONSTRUÇÃO MODULAR

A construção modular, conforme definida por (Thai, 2020), é um método construtivo que envolve a utilização de módulos fabricados externamente e depois transportados para o canteiro de obras para montagem. Esses módulos são normalmente projetados para serem facilmente conectados e desconectados, permitindo flexibilidade no projeto e na construção.

O conceito de modularidade em projetos de construção pode ser visto tanto de uma perspectiva baseada em projeto quanto de operações (Gavina, 2021). A modularidade do produto, um conceito relacionado, é definida em termos de separabilidade e combinabilidade de componentes (Rossi, 2019). (Ferdous, 2019) enfatiza a importância de uma abordagem sistemática para modularização, com o primeiro propondo uma metodologia para sistemas de fabricação e o último discutindo a necessidade de diretrizes de projeto e de trabalhadores qualificados (Figura 4).

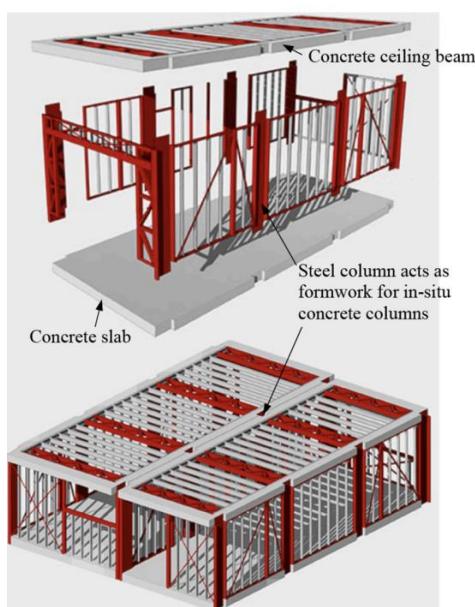


Figura 4 - Unidade Modular de um Edifício Fonte: Thai, 2020

O método de construção modular pode ser dividido em painéis 2D e módulos 3D, uma série de estudos exploraram o uso de diferentes métodos de construção modular, incluindo módulos 3D e painéis 2D. (Raffoul, 2019) discute os benefícios de uma abordagem híbrida, que combina módulos 3D para áreas de alto serviço e painéis 2D para espaços mais abertos.

A diferença entre painéis 2D e módulos 3D na construção modular reside no seu design e aplicação. Painéis 2D, são frequentemente usados para pisos e paredes em áreas de plano aberto, enquanto módulos 3D, são empregados para peças de alta complexidade e manutenção, como cozinhas e banheiros (Raffoul, 2019).

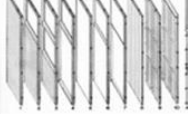
Módulo Básico	Recurso	Precedência	Exemplo	
 1D	- Componentes em fábrica para reduzir a mão de obra no local - Construções mais flexíveis	 Packaged House	 FlatPak	 iT House
 2D	- Módulos sencionais pela facilidade de transporte - Potenciais para fabricação digital	 Double-Wide	 kitHAUS	 ESG Pavilion
 3D	- Módulos 3D - Conexões simples com a fundação - O tamanho da unidade modular é restrito por requisitos de transporte	 Habitat '67	 weeHouse	 Dwell Home

Tabela 2 - Tipos de sistema modular básico. Fonte: Adaptado pela autora de (Huang, 2007)

(Tavares, 2021) compara a relação custo-eficácia da construção em painéis e modular, sendo esta última marginalmente mais rentável. (Rosarius, 2021) discute o potencial da automação na indústria pré-fabricada, o que poderia impactar a escolha do método de construção. (Kuda, 2020) explora o potencial de reutilização de painéis de concreto e madeira, respectivamente, na construção modular.

(Salama, 2020) identifica os principais fatores que afetam a configuração de módulos em projetos de construção híbrida, utilizando estes fatores para introduzir uma nova estrutura de configuração que deverá ajudar os intervenientes na construção híbrida a identificarem a configuração mais adequada para cada tipo de módulos (ou painéis) nos seus projetos.

A escolha dos painéis 2D para construção modular depende de vários fatores. (Salama, 2020) identifica restrições que afetam os tamanhos e dimensões dos módulos, como transporte, localização da obra, tempo de estaleiro, entre outros. Portanto, a escolha entre painéis 2D e 3D deve ser feita com base nos requisitos e restrições específicas do projeto de construção.

Na construção em painéis, os painéis individuais são pré-fabricados em uma fábrica e depois montados no local. Os painéis podem ser usados para criar uma variedade de tipos de construção, incluindo paredes, pisos e telhados. Os painéis 2D oferecem flexibilidade no design e são mais fáceis de transportar, mas exigem maior montagem no local e têm capacidades estruturais limitadas.

Na construção modular 3D, módulos inteiros são pré-fabricados em uma fábrica. Esses módulos geralmente são construídos com componentes interligados e podem ser usados para criar edifícios de vários andares. Os módulos 3D são mais complexos de transportar e exigem um planejamento de construção mais detalhado, mas oferecem maior integridade estrutural e podem ser utilizados em edifícios mais altos. (Ferdous, 2019). Na Figura 5, é sintetizado a relação entre o tempo de fabricação e montagem de cada módulo básico.

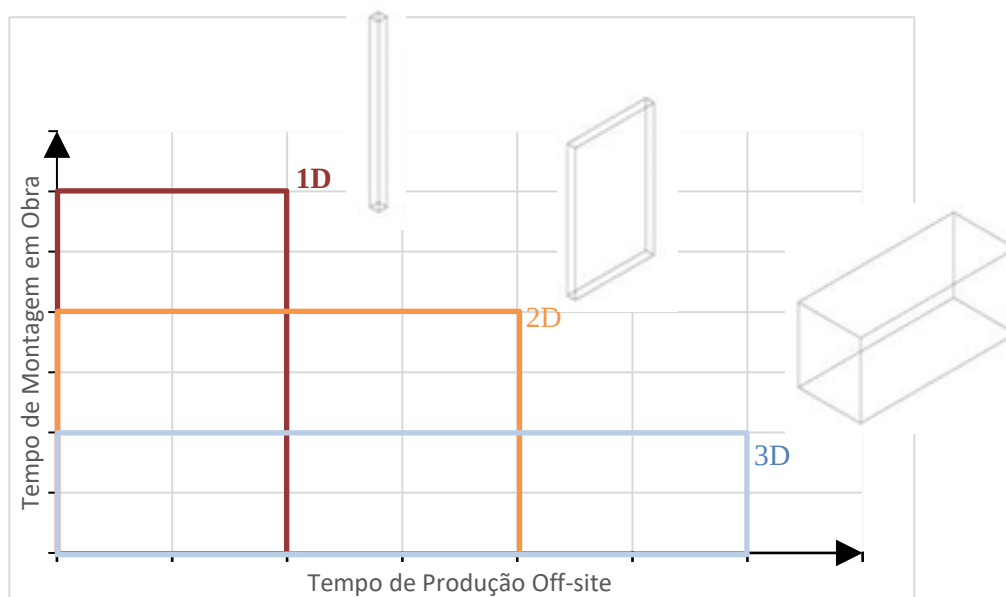


Figura 5 - Relação tempo de Montagem em obra x Tempo de produção off-site. Fonte: Autora

A indústria da construção modular tem experimentado um crescimento significativo e é considerada uma alternativa mais eficiente, mais sustentável e acessível para a entrega de projetos de construção (Karthik, 2020) relativamente aos métodos correntes de construção.

A construção modular visa melhorar a eficiência dos recursos, a produtividade e a sustentabilidade no setor da construção (Iacovidou, 2021), incluem ainda, construção mais rápida, melhor qualidade e redução do desperdício de recursos (Thai, 2020) Este método oferece vantagens como melhor cronograma do projeto, custo, segurança do trabalho, qualidade e produtividade, bem como benefícios ambientais (Peter, 2022).

A construção modular deve ser baseada em um conjunto de princípios que incluem o uso de modularização, sistemas de montagem e novas tecnologias (Staib, 2018). A aplicação da modularidade como ferramenta para sistemas de produção flexíveis e eficientes também é crucial (Svetlík, 2019). Além disso, o uso de metodologias e técnicas Lean, bem como uma abordagem de estrutura multicritério, pode auxiliar na seleção de métodos de construção modular (Innella, 2019). No contexto de edifícios altos, por exemplo, o desenvolvimento de sistemas estruturais fortes, técnicas de união e diretrizes de projeto é crucial (Thai, 2020).

Algumas práticas para elaboração de projeto de construção modular, garantem a maximização da eficiência, sustentabilidade e qualidade dos resultados, como a adoção de design paramétrico, com softwares como Grasshopper e o Rhino (Alwisý , 2019) e (Burggräf, 2021), para criar modelos que definem regras e permitem variações conforme necessidades específicas, além da integração do BIM para gerenciamento centralizado de dados e detecção de conflitos (Abazid, 2019), (Cook, 2024). Outra prática, diz respeito a concepção do projeto, atentando à projetos que minimizem o desperdício durante a pré-fabricação e garantam uma montagem eficiente no local (Banihashemi et al., 2018), (Greenough, 2019), integrando ferramentas de análise estrutural ao software paramétrico para otimizar o projeto de componentes quanto à resistência e uso de materiais (Ajouz, 2021). A seleção de materiais sustentáveis com baixo impacto ambiental

(Banihashemi et al., 2018) e exploração de projetos que integrem recursos de eficiência energética e minimizem os custos operacionais (Al-Azzawi, 2021), incorporando a participação do usuário durante os estágios iniciais de projeto, contribuem para garantir que o produto final atenda às necessidades e expectativas (Daher, 2018).

Além das práticas mencionadas, a avaliação da viabilidade e adequação de um projeto de construção modular também desempenha um papel crucial. (Salama et. al., 2020) apresenta um novo indicador para avaliar a viabilidade da construção modular em um projeto. Denominado de Índice de adequação modular (MAI), utiliza cinco índices:

- Índice de conexões (CI) para avaliar as conexões do módulo usando a técnica de agrupamento de matrizes;
- Índice de dimensões de transporte (TDI) para avaliar os efeitos das dimensões do módulo no transporte;
- Índice de distância de transporte e envio (TSDI) para avaliar a distância entre as instalações de fabricação e o canteiro de obras;
- Índice de penalidade de custo do guindaste (CCPI) para avaliar o custo do guindaste relevante para a taxa de colocação do módulo;
- Índice de volume de concreto (CVI) para avaliar as quantidades de concreto da fundação do projeto.

O MAI é calculado como uma média ponderada dos índices individuais, com pesos atribuídos a cada um deles, podendo variar de acordo com o projeto e as prioridades.

Apesar dos seus muitos benefícios, a construção modular também enfrenta vários desafios, como a estabilidade estrutural em edifícios altos (Liewa, 2018), elevados custos iniciais de construção, obstáculos técnicos e de instalação, e falta de negócios locais de pré-fabricação (Beulah, 2022), continuidade do caminho de carga, transferência lateral de carga e questões especiais de segurança estrutural (Ramaji, 2018), e a necessidade de equilibrar custo e valor do projeto (Akinradewo, 2021). Ainda é necessário diretrizes de projeto, sistemas estruturais fortes e técnicas de união (Lee, 2019).

Outro desafio deve-se a mudança de paradigma relativo ao desenvolvimento do projeto, com o uso de ferramentas paramétricas integrado ao BIM (Alwisy, 2019), e automatização (Aftab, 2023) de tarefas, projetos e desenhos de componentes modulares. Assim, o domínio do design paramétrico e das ferramentas de design generativos, sugerem a necessidade de uma mudança dos métodos tradicionais.

A construção modular apresenta uma série de desafios de sustentabilidade, mas também oferece um potencial significativo para o desenvolvimento sustentável. (Nguyen, 2022) destaca a necessidade de uma avaliação sistemática da sustentabilidade na construção modular, (Thirunavukkarasu, 2021) sublinha a importância dos avanços nos materiais e na produção para alcançar objetivos sustentáveis, com (Musa, 2018) focando especificamente no equilíbrio entre as preocupações ambientais e de construção. (Horinkova, 2021) fornece estruturas para avaliar e comparar o desempenho de sustentabilidade da construção modular, discutindo os impactos ambientais, como redução de resíduos, emissões mais baixas, potencial para materiais mais sustentáveis. (Loizou, 2021) explora ainda mais os benefícios potenciais da modularidade no design sustentável, incluindo a redução de resíduos. Em ambientes urbanos densos, os desafios incluem o acesso ao local e a área de armazenamento no local (Choi, 2019). O peso dos módulos,

juntas especiais e tecnologias de automação também são considerações importantes (Liewa, 2018).

A correlação entre a construção modular e a sustentabilidade no ciclo de vida do edifício é uma consideração fundamental (Peter, 2022), tal como o desempenho do ciclo de vida dos edifícios modulares, que se tem demonstrado melhor em termos de desempenho energético (Kamali, 2018).

2.2.2. DFMA – DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY

O DfMA na construção emerge como uma filosofia que busca otimizar projetos para fabricação e montagem, impulsionando a industrialização da construção. A potencialização da eficiência, redução custos e tempo de construção, além do aumento qualidade das edificações através da padronização e do controle em ambientes fabris, são os principais objetivos, que também contribui para a sustentabilidade ao minimizar o desperdício e aumentar a segurança no canteiro de obra.

No entanto, a implementação do DfMA exige uma mudança de paradigma na indústria, o que pode ser desafiador para empresas e profissionais habituados aos métodos tradicionais. Além disso, o investimento inicial em infraestrutura e ferramentas pode ser alto, e a padronização necessária pode limitar a flexibilidade do design. A logística do transporte e da instalação de componentes pré-fabricados, especialmente em áreas remotas, também representa um desafio. Sendo, a integração entre diferentes disciplinas, como arquitetura, engenharia e fabricação, crucial para o sucesso do DfMA.

O DfMA teve origem durante a Segunda Guerra Mundial, quando a Ford e a Chrysler o aplicaram como um princípio em seus processos de produção de armas, no setor de manufatura. (Weisheng, 2021). Com abordagens formais de projeto para fabricação (DfM) e design para montagem (DfA) surgidas no final dos anos 60 e início dos anos 70, desenvolvidas principalmente na Suécia e Japão (Muhammad, 2020) e baseadas nas normas britânicas sobre gerenciamento do design para produção econômica, ocorre uma mudança de pensando do projeto tradicional e sequencial, para uma metodologia não linear. O DfMA começa por ser aplicado à indústria automóvel devido à necessidade de se produzir mais rápido, com muita precisão e qualidade, e em grande escala (Gao, 2019) Mas rapidamente esta metodologia começou a conquistar também adeptos no sector da construção civil. Com raízes em vários conceitos relacionados, como capacidade de construção, construção enxuta e gestão de valor (Lu, 2020) a abordagem foi ainda mais refinada por pioneiros como Geoffrey Boothroyd e Peter Dewhurst, que desenvolveram o sistema Boothroyd & Dewhurst DFMA para agilizar o desenvolvimento de produtos e redução de custos (Alfieri, 2020).

Na década de 1980, ganha um maior destaque, com o desenvolvimento de tecnologias de design auxiliado por computador (CAD) e de fabricação auxiliada por computador (CAM), que permitiram uma integração mais perfeita entre design e fabricação (Gao, 2019). Desde então, os princípios do DfMA foram amplamente adotados em vários setores, incluindo automotivo, aeroespacial e eletrônico, para agilizar a produção e reduzir custos (Antony, 2020). O conceito continua a evoluir com o avanço das tecnologias digitais, como a impressão 3D e a prototipagem virtual, que melhoram ainda mais o processo de design e fabricação (Boothroyd, 2010), com foco na minimização de componentes e no tempo de montagem (Antony, 2020). O DfMA tem sido particularmente importante na indústria automotiva, onde tem sido utilizado para reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos (Antony, 2020). O DfMA foi reconhecido como uma

filosofia revolucionária na construção, particularmente no contexto da pré-fabricação externa e da montagem no local (Gao, 2019)

O conceito de DfMA evoluiu para incluir a fabricação digital e a manufatura aditiva, com foco na maximização da eficiência do processo (Tuvyanond, 2023). (Iacovidou, 2021) enfatiza a importância da integração de tecnologias inteligentes em componentes modulares para promover a eficiência de recursos e a produtividade. As potências sinérgicas entre o DfMA e a Entrega Integrada de Projetos (IPD) foram exploradas, com uma estrutura desenvolvida para integrar estes dois métodos em projetos de construção (Rankohi, 2022). (Doroshenko, 2023) discute o uso de conexões aparafusadas em estruturas metálicas para simplificar a instalação e permitir a desmontagem. (Kolugala, 2022) destaca a necessidade de colaboração e inovação na adoção da construção modular, com (Chen, 2022) focando especificamente na gestão da inovação tecnológica em áreas complexas. (Wrigley, 2021) aborda os aspectos financeiros da construção modular, sendo que o primeiro propõe um modelo de otimização de layout para plantas de processo e o segundo discute os desafios e iniciativas no financiamento da indústria.

O DfMA e o IPD possuem o foco em colaboração e eficiência, enfatizando a importância da colaboração entre as partes interessadas, incluindo projetistas, fabricantes e construtores, para otimizar o resultado do projeto. Enquanto o DfMA visa simplificar e otimizar os processos de fabricação e montagem, o IPD busca aumentar a eficiência do projeto por meio de um fluxo de trabalho unificado, entre as diversas especialidades envolvidas no projeto. A integração de tecnologias e métodos inovadores é fundamental tanto para o DfMA quanto para o IPD, facilitando melhores decisões de projeto, processos de fabricação e práticas de construção (Rankohi, 2022).

Design for Manufacture and Assembly (DfMA) é a união de dois conceitos: O Design for Assembly (DfA), que se concentra na montagem e simplificação de conexões, e o Design for Manufacture (DfM), que se concentra principalmente na produção dos componentes individuais (Tuvyanond, 2023). Trata-se de uma filosofia e metodologia que visa otimizar projetos de produtos para fabricação e montagem (Gao, 2019) nas indústrias correntes, reduzindo, em última análise, custos, tempo de produção e melhoria da qualidade do produto (Antony, 2020) podendo ainda aumentar a eficiência e adaptar-se às novas tecnologias. Tendo como princípio fundamental a produção de projetos com menor número de peças, bem como peças fáceis de montar (Gao, 2019). Dessa forma, o DfMA pode ser entendido como um procedimento sistemático, que, quando aplicado como parte da fase de projeto, adiciona valor ao processo de construção e produção. (Figura 6)

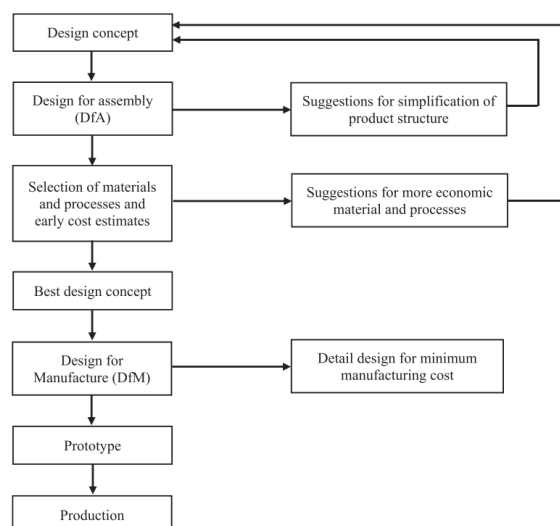


Figura 6 - Fases de um processo de DfMA Fonte: Gao 2019

O DfMA toma uma nova direção na construção, impulsionada por avanços nos materiais de construção, tecnologias de produção e montagem, e logística e gestão da cadeia de abastecimento (Lu, 2020). No contexto da fabricação digital e da manufatura aditiva, o DfMA maximiza a eficiência do processo (Tuvayanond, 2023). A literatura concentra-se cada vez mais na integração e compartilhamento de informações durante o ciclo de vida do projeto para otimizar o projeto, a fabricação e a montagem (Rankohi, 2022).

DfMA na Arquitetura e na Construção:

Segundo (Shangao, 2019) o DfMA na construção tem sido interpretado a partir de três perspectivas:

- Um processo de design que abrange como a estrutura ou objeto será fabricado, montado e orientado com os princípios do DfMA;
- Um sistema de avaliação que pode funcionar com projeto e construção virtual (VDC) para avaliar a eficiência de fabricação e montagem;
- Uma filosofia revolucionária que abrange as tecnologias de pré-fabricação e construção modular em constante mudança.

Em projeto de arquitetura, a utilização dos princípios do DfMA, como a minimização/simplicidade de projeto, padronização e facilidade de manuseio, são usados para avaliar o uso de elementos pré-fabricados (Safaa, 2019). Envolve projetar, dessa forma, produtos que conduza à fabricação e montagem (Gao, 2019). A metodologia também é utilizada para melhorar o design dos produtos, levando à redução de custos e aumento da qualidade (Gupta, 2019).

O projeto detalhado exige um planejamento cuidadoso, antecipar problemas nas etapas de fabricação e montagem através da escolha de materiais/componentes (Weishengs et al., 2021), integrando diferentes disciplinas de design, como a coordenação da estrutura modular, fachada e sistema mecânico, elétrico e de bombeamento (MEP) (Banks et al., 2018).

O uso do DfMA em processos de projeto de construção fora do local foi proposto para aumentar a eficiência (Hyun, 2022), e está sendo explorado no contexto da adaptabilidade e circularidade da construção (Askar, 2022). É particularmente relevante no contexto de edifícios pré-fabricados (Yuan, 2018), onde o DfMA tem sido discutido, como uma proposta de processo de projeto integrado (IPD) (Hyun, 2022). Pode ser aplicado de várias maneiras, como por meio de um sistema de controle distribuído para sistemas de produção flexíveis (Tan, 2020) uma abordagem baseada em BIM na construção civil (Alfieri, 2020).

A integração do DfMA com o BIM ao longo do ciclo de vida do ativo também foi explorada (Abrishami, 2021). Já em escritórios e como parte de gestão de projeto, a integração com a filosofia Lean, tem sido amplamente discutida (Othman, 2018), assim como outras metodologias de gestão enxuta e fabricação digital foram destacadas, com foco no projeto para atingir valor e engenharia simultânea (Ng, 2019), com seus princípios de otimização e coordenação demonstraram melhorar a sustentabilidade, a velocidade e a relação custo-benefício da construção pré-fabricada (Wasim, 2020). No entanto, a aplicação do DfMA na arquitetura tem seus desafios, incluindo a necessidade de informações mais centradas no usuário nos manuais do DfA (Mosca, 2018).

O Royal Institute of British Architects (RIBA, 2024), define DfMA na construção como uma abordagem que facilita uma maior fabricação fora do local e minimiza a construção no local. Os níveis de DfMA categorizados por RIBA, incentivam um projeto que considera todo o ciclo de vida do edifício, desde a fabricação e montagem até a operação e possíveis mudanças. O DfMA Overlay to Plan of Work do RIBA (Figura 7) fornece uma estrutura para que os arquitetos integrem métodos modernos de construção (MMC) em seus projetos, promovendo uma mentalidade de fabricação e colaboração entre disciplinas. O RIBA, enfatiza a importância de considerar os métodos modernos de construção, que incluem o DfMA, desde o início dos estágios do projeto conceitual, denominado Etapa 2. Sugere ainda que sejam desenvolvidas informações detalhadas necessárias para a fabricação e construção do edifício, na Etapa 4, com foco na fabricação e construção (Etapa 5) e na Entrega (Etapa 6), considerando a montagem de componentes e/ou subconjuntos modulares com dados de manutenção e gerenciamento de ativos, entregue para o uso efetivo do edifício.

As categorias da Sobreposição DfMA (Figura 7) são aplicadas na fase de projeto, orientando a seleção de métodos e materiais de construção que otimizam o processo de construção, por meio de uma abordagem estruturada para incorporar os princípios de projeto para fabricação e montagem.

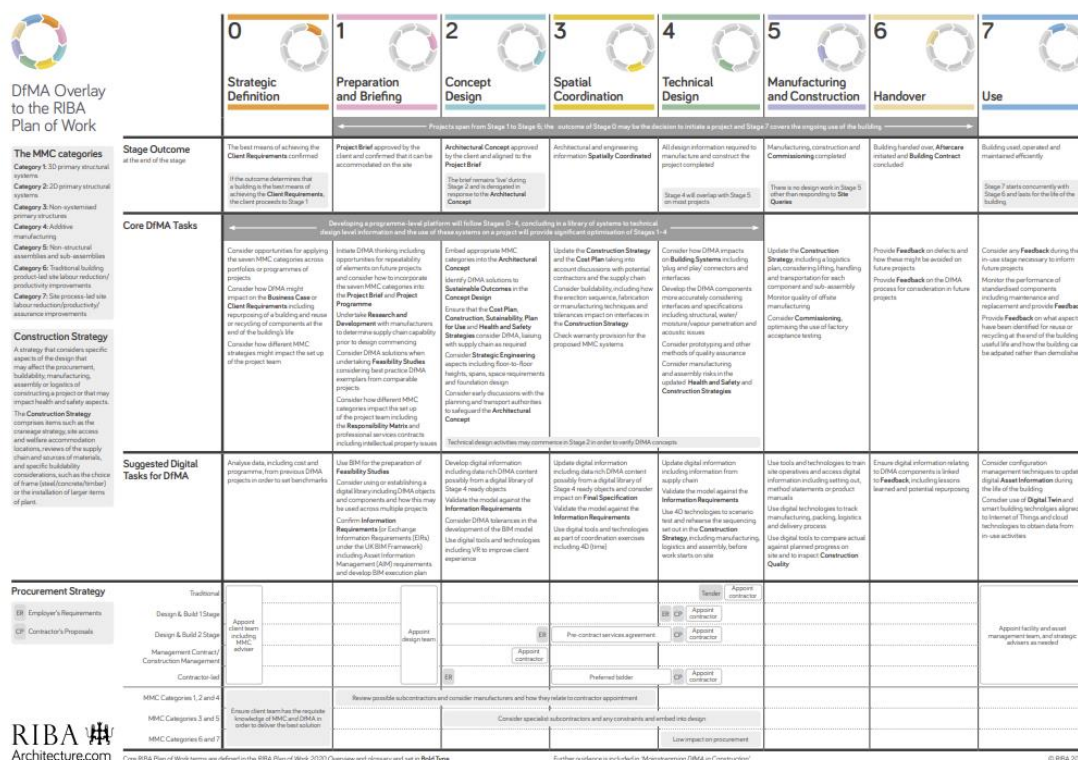


Figura 7 – DfMA Overlay to Plan of Work Fonte: RIBA

A construção também se beneficia com a utilização do DfMA desde a etapa de projeto, com a redução de peças em módulos pré-fabricados para montagem e estabelecendo um ambiente de engenharia simultâneo, incentivando o trabalho em equipe entre designers, fornecedores, engenheiros de produção (Weishengs et al., 2021). Com projetos desenvolvidos dentro dos princípios do DfMA, melhoraram a qualidade e o desempenho de segurança, bem como níveis mais elevados de produtividade, mitigando os riscos de problemas imprevistos em obra (Roxas, 2023).

Dessa forma, na indústria da construção, o DfMA destina-se a melhorar a eficiência da produção, mantendo os custos de produção baixos, garantindo segurança, velocidade, qualidade, garantindo conformidade regulamentar, tendo em vista uma produção eficiente (Thompson, 2021).

A integração do DfMA com novas tecnologias é um foco fundamental na indústria da construção. O BIM e o DfMA foram propostos como uma solução para problemas tradicionais de construção, sendo uma biblioteca BIM de componentes externos um facilitador chave (Abrishami, 2021). O potencial do DfMA na fabricação digital e na fabricação aditiva também está sendo explorado, com necessidade de mais pesquisa e desenvolvimento (Tuvayanond, 2023), as tecnologias digitais usadas no DfMA são divididas em categorias de modelagem de informações de construção (BIM), interoperabilidade e virtualização de acordo com sua aplicação.

(Cheng, 2023) explica como essas tecnologias podem ser utilizadas, o BIM é usado para o design e planejamento de projetos inteiros por meio de modelos virtuais nas fases iniciais, fornecendo orientação para a produção real. A interoperabilidade garante que os arquivos de diferentes tecnologias digitais por vários interessados sejam compatíveis e possam ser lidos com sucesso. A

virtualização permite a comunicação entre os mundos virtual e físico, garantindo que a fabricação e montagem estejam em conformidade com os requisitos de design e possam fornecer feedback para alcançar sincronização e modificação em tempo real do plano de design.

De forma direta, o DfMA busca a redução do número de componentes e do tempo de montagem, minimizando os custos e maximizando os lucros sem comprometer a qualidade do produto (Antony, 2020). Considerando as questões de fabricação desde o início do processo de projeto para acelerar o tempo de colocação no mercado (Tan, 2020). Na indústria de construção, o DFMA visa maximizar a eficiência dos processos, a eficiência operacional e as práticas sustentáveis (Laovisutthichai, 2022). É também usado para melhorar a eficiência do projeto, reduzir custos de produção e encurtar o tempo de desenvolvimento do produto (Gupta, 2019). É possível pontuar, não de forma independente, mas como um conjunto de objetivos enquanto a sistematização na utilização do método DfMA:

- **Qualidade:** Avaliando desde o projeto até o produto, considerando o processo de fabricação e montagem, como na facilidade e simplificação dos componentes e conexões;
- **Eficiência e Segurança:** A utilização mais eficiente de todos os recursos, melhorando a colaboração das diferentes especialidades que compõem um projeto, minimizando desperdícios e custo, promover a segurança, através da melhoria contínua e identificação de possíveis ocorrências em obra.
- **Controle e redução de custos:** Redução dos custos gerais de mão de obra, material e tempo, através de um controle e coordenação de gestão global dos recursos, com menor desperdício, através de processos mais simplificados.
- **Flexibilidade e Adaptabilidade:** Componentes de fácil adaptação às mudanças de requisitos que atendam a diferentes exigências, garantindo a adaptabilidade e flexibilidade do produto, é um dos princípios do DfMA que contribuem para a construção mais sustentável, segura e confiável;
- **Redução de Desperdício:** Através de maior controle da qualidade, com eficiência no planejamento e organização do processo, dentro o controle de custos e recursos, garantindo a flexibilidade do produto, é possível maximizar a redução de desperdícios;

“Simplification can be realized, on the one hand, by eliminating non-value-adding activities from the production process, and on the other hand by reconfiguring value-adding parts or steps.”
Koskela (2000)

(Koskela, 2000) sugere, na frase acima, que a simplificação do processo de produção pode ser obtida por meio de duas estratégias principais. Com a eliminação de atividades que não agregam valor, identificando e removendo todas as etapas do processo de produção que não contribuem para o valor final do produto, como tarefas redundantes, movimentos desnecessários. E reconfigurando as etapas de agregação de valor, reestruturando ou redesenhando as partes do processo que de fato agregam valor ao produto, com o objetivo de tornar essas etapas mais eficientes e eficazes, como a combinação de tarefas, a simplificação de fluxos de trabalho ou a introdução de melhores técnicas ou tecnologias.

(Tan, 2020) enfatiza a necessidade de diretrizes DfMA orientadas para a construção, que devem considerar a base contextual, a racionalização tecnológica, a otimização logística, a integração de componentes e a redução de materiais, enquanto (Antony, 2020) destaca ainda mais a importância

das diretrizes do DfMA na redução de custos, na aceleração do tempo de colocação no mercado e na melhoria do design do produto. Há várias aplicações do DfMA no âmbito de projeto:

- (Gao, 2019) apresenta dez princípios e regras do DfMA, um conjunto de regras ou diretrizes qualitativas não específicas e exigem (aos projetistas e engenheiros), interpretá-las em casos individuais.
 1. minimizar o número total de peças
 2. desenvolver um projeto modular
 3. usar componentes padrão,
 4. projetar peças multifuncionais,
 5. projetar peças para facilidade de fabricação e montagem,
 6. evitar fixadores separados,
 7. minimizar a montagem com instruções,
 8. maximizar a conformidade
 9. minimizar o manuseio.
- (Abd Razak, 2022), detalha os princípios como:
 - Aplicar o DfMA na fase inicial de design do projeto, considerando os requisitos de fabricação e montagem;
 - Avaliar a eficiência e o custo da fabricação e da montagem, buscando reduzir o número de peças, simplificar as conexões e minimizar os resíduos;
 - Integrar o conhecimento e a informação de outras etapas do processo construtivo, como planejamento, logística, suprimentos e operação;
 - Utilizar tecnologias digitais, como o BIM (Building Information Modeling), para facilitar a modelagem, a simulação e a coordenação do projeto;
 - Promover a colaboração e a comunicação entre os diferentes agentes envolvidos no projeto, através de equipes multidisciplinares que envolvam projetistas, fabricantes, montadores e usuários finais.
 - Usar sistemas de projeto e construção virtual (VDC) para simular e otimizar o processo de DfMA.
 - Entender os princípios enxutos de produção e eliminar desperdícios e atividades que não agregam valor.

De forma atenta, é possível observar que, apesar dessas diretrizes/princípios terem diferentes pontos de vista, elas compartilham semelhanças, como: **minimização, padronização e design modular** como a chave características dos princípios DfMA. No entanto, as práticas atuais do DfMA na construção ainda seguem, em geral, as diretrizes do DfMA desenvolvidas num contexto de produção, sem considerar suficientemente as diferenças entre a construção e a produção. (Weisheng, 2021)

Como dito anteriormente, a necessidade de diretrizes DfMA orientadas para a construção padrão, aplicação prática de ferramentas DfMA e integração com tecnologias emergentes (Roxas, 2023) são alguns dos desafios apresentados. De forma mais geral, é possível ainda definir desafios relacionados as restrições contratuais, tecnológicas, processuais, culturais, comerciais, geográficas, financeiras e técnicas/cognitivas (Rankohi, 2023), sendo necessário a utilização de estratégias, quadros e planos de implementação e orientação (Lu, 2020).

(Abd Razak, 2022) apresenta desafios mais específicos do DfMA, destacados de vários autores:

- A necessidade de envolvimento de uma equipe multidisciplinar desde a fase inicial do projeto;
- A padronização pode limitar a flexibilidade do projeto e exige congelamento antecipado do projeto;
- A contratação tradicional impõe a engenharia sequencial e a separação do projeto e construção;
- Há necessidade de treinamento da equipe para entender e implementar os princípios do DfMA de forma eficaz;
- Os fornecedores geralmente contribuem pouco durante a fase inicial do projeto;
- O processo de projeto envolve um aumento de tempo desta fase;
- Falta de planejamento e de códigos de construção que adotem os princípios do DfMA;
- Falta de um ecossistema adequado que inclua diretrizes, padrões e tecnologias acessíveis;
- Soluções inovadoras podem estar fora dos padrões existentes, levando os clientes a enfrentar incertezas devido à falta de procedimentos padronizados. Sendo fundamental estratégias para incorporar com segurança tais inovações;
- Existem poucos dados sobre a aplicação DfMA para mostrar o benefício real, o que impede sua adoção generalizada;

O objetivo essencial do DfMA precisa ser devidamente digerido e compreendido como aproveitando todo o seu potencial, onde as partes interessadas mudem o seu paradigma dos meios convencionais de design, produção e construção (Yuan et al., 2018).

Casos de aplicação DfMA mais bem-sucedidos incentivarão a difusão do DfMA na indústria AEC (Weisheng, 2021). Em contraponto, se novas tecnologias fossem necessárias para apoiar aplicações DfMA, poderá ser necessário investimento extra, tornando o DfMA menos competitivo. (Weisheng, 2021)

À medida que a tecnologia avança e os custos diminuem, espera-se que o DfMA se torne uma prática cada vez mais comum, construindo um futuro mais otimizado para o setor.

2.2.3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A Inteligência Artificial (IA) é um campo que visa criar máquinas, muitas vezes através do estudo da função e do comportamento do cérebro humano (Sahoo, 2021), com capacidade de realizar tarefas com raciocínio lógico, aprendizagem e resolução de problemas (Morandín-Ahuerma, 2022).

Na CM, algoritmos de IA podem ser usados para gerar e analisar opções de projetos de unidades modulares com base em parâmetros predefinidos como tamanho, função, requisitos de código de construção e restrições de materiais, em conjuntos com o design paramétrico, por exemplo. Isso permite explorar um espaço de design mais amplo e potencialmente identificar soluções mais eficientes e inovadoras em comparação com os métodos de design tradicionais. A padronização presente na construção modular, reforça o potencial de utilização da IA. Integrada ao software Building Information Modeling (BIM) pode ainda, ajudar a identificar possíveis conflitos entre

componentes, otimizar o uso de materiais para minimizar desperdícios e sugerir melhorias no design geral para melhor montagem e funcionalidade.

A aplicação da IA e do BIM na construção modular representa um passo significativo para a integração completa das tecnologias digitais no setor da construção. Contudo, para maximizar o potencial dessas ferramentas, é essencial promover a interconexão com outras inovações que surgem com a evolução da indústria 4.0, digitalização e automação (Wang, 2020). Sendo o BIM a tecnologia digital mais desenvolvida, é necessário ligarmos ele a outras tecnologias, ainda que usadas de forma independente (Luo, 2018).

(Baduge, 2022) demonstra a transição dos métodos tradicionais de construção, para a construção industrializada, e sua integração com tecnologias, como inteligência artificial, BIM e construção enxuta (Figura 8) Figura 8 - Transição de uma construção convencional para uma construção industrializada. Fonte: (Baduge, 2022)

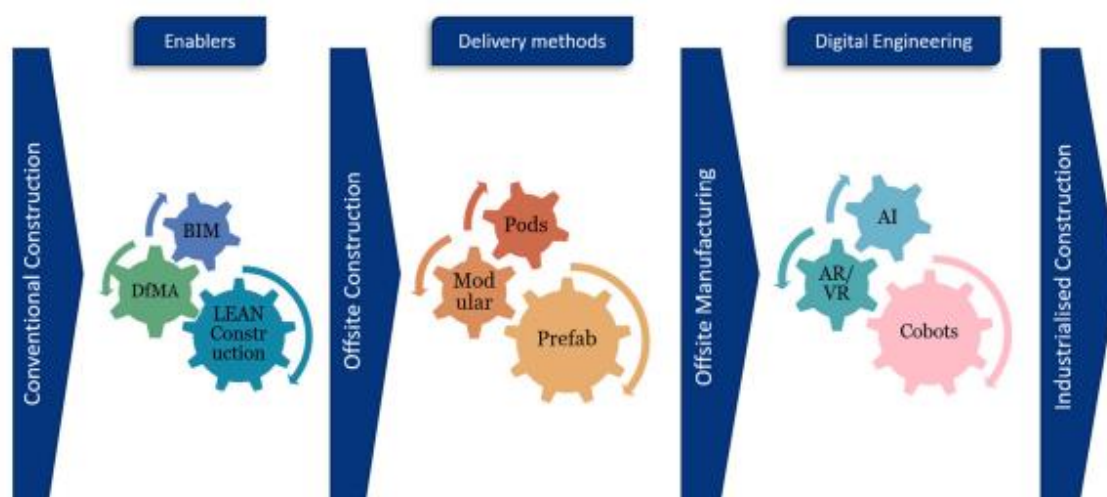


Figura 8 - Transição de uma construção convencional para uma construção industrializada. Fonte: (Baduge, 2022)

A transição da automação para IA e máquina sistemas de aprendizagem começou quando as empresas perceberam que a plataforma atual não conseguia lidar com uma grande quantidade de dados (Martinez, 2019). Cada local de trabalho se tornou uma fonte potencial de dados para IA aonde as empresas podem aprender e melhorar os métodos tradicionais anteriores (Shukla, 2019), gerenciando esses projetos de forma mais eficiente incorporando informações e repositórios de conhecimento. (Darko, 2020) e (Bolek, 2023) destacam o crescente interesse pela IA na arquitetura e (Ji, 2022) direciona a eficácia da tecnologia de redes neurais no projeto arquitetônico.

(Wang, 2020) identifica as seguintes tecnologias digitais, dentro da indústria da construção:

- BIM
- RFID (Dispositivos de identificação por radiofrequência)
- GPS (Sistema de Posicionamento Global)
- IoT (Internet das Coisas)
- Sensores
- VR (Realidade Virtual)
- AR (Realidade aumentada)

- Digitalização a laser
- AI (inteligência Artificial)
- Robótica
- Blockchain

Se tais tecnologias podem e são utilizadas sozinhas, com uma expressiva significância na otimização dos recursos (Grover, 2020), a combinação delas torna o avanço ainda mais interessante. É o caso, por exemplo, da utilização de IA para design generativo juntamente com o BIM discutida por (Yin, 2019)

(Ragona et al., 2022) afirma que a IA é capaz de realizar tarefas que podem ser operadas automaticamente usando dispositivos mecânicos e eletrônicos autônomos através do controle da inteligência. A IA não se limita à inteligência semelhante à humana, mas inclui também o controle eficiente e independente da tecnologia (Mainzer, 2019).

(Ragona et al., 2022) divide, em termos conceituais, a IA em três tipos, sendo elas:

- Inteligência Artificial Estreita (ANI): IA existente é usado na tradução de idiomas e nas previsões meteorológicas.
- Inteligência Geral Artificial (AGI): IA com capacidade de resolver problemas complexos problemas com seus próprios pensamentos e disposição.
- Superinteligência Artificial (ASI): IA que um dia poderá exceder a inteligência humana. capacidades em vários domínios (Bolpagni, 2021).

(Ragona et al., 2022) ainda apresenta os subcampos mais comuns e suas derivações dentro do conceito de IA, conforme Figura 9.

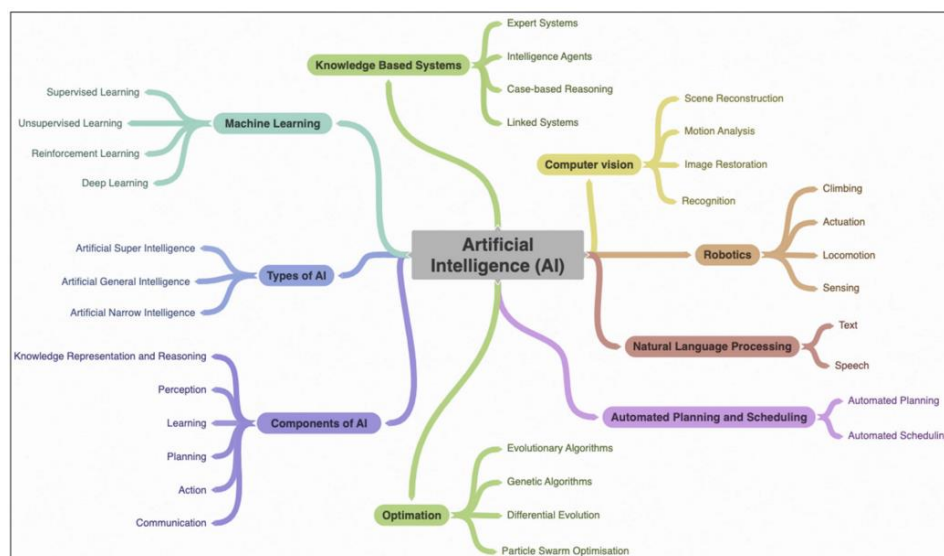


Figura 9 - Subdivisões da AI Fonte: Ramona, 2022

A IA na indústria da construção é uma tecnologia poderosa com benefícios potenciais, como economia de tempo, inovação e digitalização, incluindo a construção pré-fabricada e modular (Pan et al., 2022), que junto com o DfMA cria um ambiente mais controlado em que a IA pode ser aplicada com eficácia. A automação e otimização de processos estão entre as principais áreas de estudo da IA (Bolpagni, 2021) podendo ser potencializadas na coleta e análise de dados, em

tarefas repetitivas, projeto e planejamento e no controle de qualidade . O uso da IA na gestão de ativos de construção é uma tendência crescente, com aplicações em gestão de energia, avaliação de condições, gestão de riscos e gestão de projetos (Rampini, 2022). A integração responsável da IA no setor da construção exige a abordagem dos riscos jurídicos, financeiros e sociais (Pillai, 2021), pauta de discussões não diferente de outros setores.

De 2014 até 2019, a indústria da construção investiu 26 mil milhões de dólares em engenharia e tecnologias de construção, incluindo IA, e acima dos 8 mil milhões de dólares nos últimos cinco anos (Young, 2021). Apesar disso, a aplicação da IA para obras de construção permanece demorado, caro e sujeito a erros, levando à lentidão na adoção da IA na construção processos (Na et al., 2022).

Dados gerados a partir de imagens, vídeos de drones, sensores de segurança e modelagem de informações de construção (BIM) são alguns exemplos do uso da tecnologia digital na fase do projeto (Ragona et al., 2022). (Pena, 2021) discute o uso de IA em projetos conceituais, enquanto com (Gilner, 2019) traz o edifício sustentável como produto, enfatizando o potencial de métodos de IA, lógica difusa e algoritmos genéticos, Engenharia Baseada em Conhecimento, redes neurais e simulação de Monte-Carlo, usados para otimizar o processo de design e os resultados do projeto. A IA também é usada no projeto de edifícios com eficiência energética, prevendo e minimizando o consumo de energia e melhorando a segurança e o conforto em ambientes residenciais (Mehmood, 2019).

Do ponto de vista do produto, e da construção como produto, a IA é utilizada no design para fabricação inteligente, com aplicações que vão desde o projeto conceitual até o detalhado (Aphirakmethawong, 2022). Na arquitetura, a IA é aplicada ao projeto conceitual, particularmente por meio de técnicas de computação evolucionária, para explorar requisitos e soluções de projeto (Pena, 2021). O uso de algoritmos de IA são propostos para automatizar elementos do processo de design da experiência do usuário, como mineração de dados e feedback de projeto (Choudhury, 2022). Dessa forma, é possível afirmar que a IA em fase de projeto, está ou poderá estar, presente em todas as etapas, desde a concepção do design até a fases de detalhamento, otimização de espaços e gerenciamento de projetos, obras e produção.

(Ragona et al., 2022) afirma que a fase de construção passa por momentos mais significativos de mudanças em relação aos métodos tradicionais. Robôs de construção e automação melhoram o ambiente de fábricas de construção, máquinas dedicadas a tarefas específicas, enquanto as máquinas cognitivas ainda estão na fase preliminar de desenvolvimento. As redes neurais artificiais, são usadas para tomada de decisões, reconhecimento de padrões e otimização em eficiência energética, análise estrutural, materiais de construção, tecnologias de cidades inteligentes e muito mais (Doroshenko, 2020).

Na engenharia estrutural, a IA é empregada para coleta, interpretação e análise de dados, além de ser utilizada para monitorar a saúde estrutural e avaliação de danos na gestão da construção (Hooda, 2021), incluindo a previsão e avaliação de parâmetros de vigas mistas e conectores de cisalhamento, e a determinação da resistência à compressão do concreto, também está sendo revisado (Cao, 2021).

A IA também é utilizada na gestão de resíduos de construção, com uma estrutura conceptual desenvolvida para uma gestão eficaz de resíduos (Ali, 2019). O potencial da aprendizagem

automática na construção, particularmente na supervisão do local, detecção automática e manutenção inteligente, também é destacado (Xu, 2021). As técnicas de aprendizagem profunda são exploradas para planejamento e gerenciamento de locais, saúde e segurança e previsão de custos de construção (Akinosho, 2020). O potencial da IA na gestão de ativos de construção também está a ser investigado, com aplicações na gestão de energia, avaliação de condições, gestão de riscos e gestão de projetos (Rampini, 2022).

O uso da IA, em suas subdivisões, está presente em diversas etapas da construção, isso inclui desde a fase de projeto já apresentado, até o canteiro de obra, com a identificação de objetos (Savio, 2022).

O recente relatório de inteligência artificial 2024 (Figura 10) publicado pelo RIBA, detalha as conclusões da pesquisa realizada com os membros do RIBA sobre a IA, e a usabilidade em cada fase do projeto, demonstra que dentro da faixa de arquitetos que já se utilizam da IA, o uso mais comum é para visualização em fase inicial do projeto, com 21% usando a IA para design generativo sempre ou com frequência, com o potencial de mudar fundamentalmente o processo de projeto.

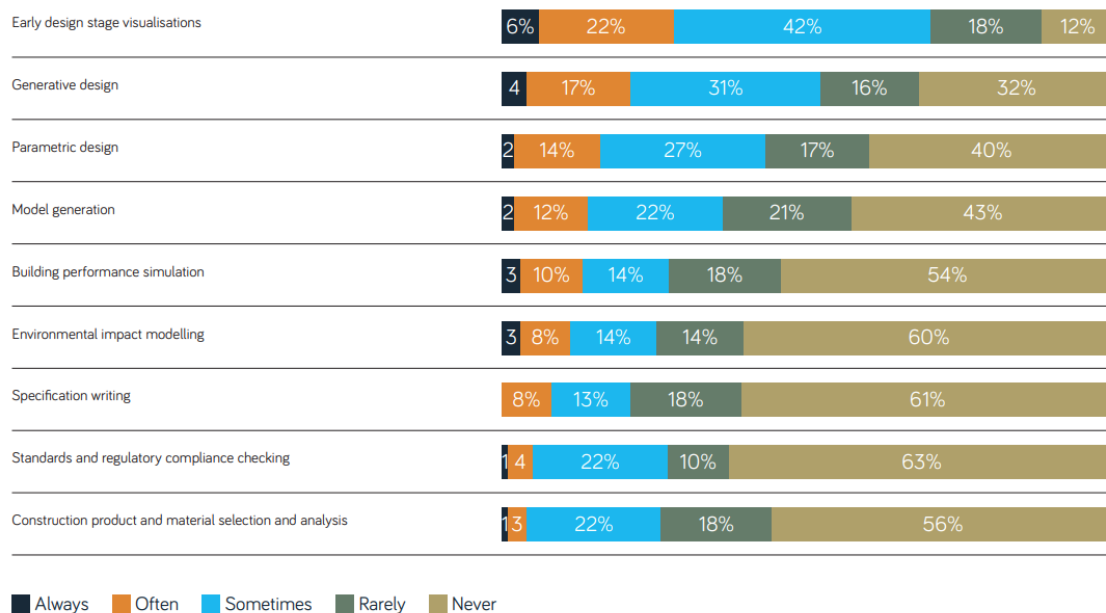


Figura 10 - Pesquisa sobre o uso da IA nas diversas fases do projeto. Fonte: RIBA

Em interface com a construção modular, a inteligência artificial desempenha um papel importante, particularmente na gestão de construção e tomada de decisões em projetos e obras e na automação de linhas tecnológicas (Sorokin, 2021). (Eber, 2019) destaca o potencial da IA na melhoria da eficiência e organização na gestão da construção, com a modularidade servindo como um princípio organizador chave para melhorar a adaptabilidade e o desempenho. Melhorando ainda, os serviços de montagem no local através da integração da Internet das Coisas e da Modelagem de Informações de Construção (Zhou, 2021), reforçar a eficiência da indústria da construção através da utilização de aprendizagem automática e métodos de lógica difusa (Kyivska, 2021).

A IA também pode ser aplicada no fluxo de trabalho de projeto de construção modular, reduzindo o tempo necessário para o desenvolvimento e melhorando a consistência e a precisão (Greenough, 2019). Com um grande foco nas redes neurais artificiais (RNA), a IA é usada para tomada de decisões, reconhecimento de padrões, otimização, previsão e análise de dados na indústria da construção (Doroshenko, 2020).

(He, 2021) discute o uso de BIM e aprendizado de máquina em projeto, pré-fabricação e supervisão de obra. Além disso, a utilização da IA na gestão da construção pode apoiar tarefas organizacionais e coordenação in-situ (Eber, 2020).

Na Figura 11, Baduge, 2022 representa a integração da IA, em todo o ciclo de vida do edifício, desde o projeto até a demolição.

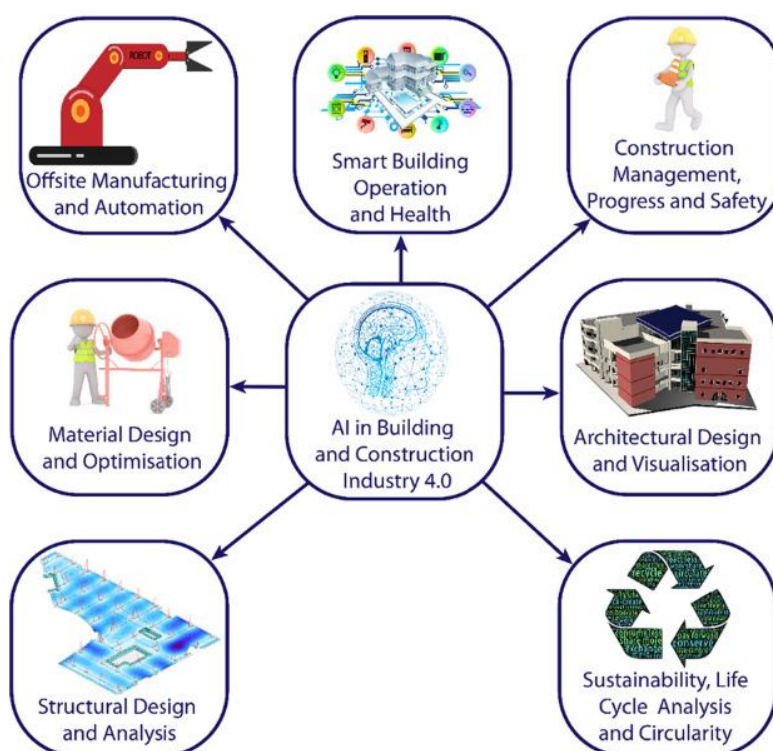


Figura 11 - Áreas de aplicação da IA no setor da indústria 4.0 Fonte: Baduge, 2022

A utilização da IA, está relacionada principalmente com a resolução de problemas complexos (Morandín-Ahuerma, 2022), tendo em vista uma melhor análise e tomada de decisão (Mohammadpoura, 2021). De forma mais direta, e entendendo a diversidade do uso da Inteligência Artificial e suas subdivisões, podemos listar alguns objetivos mais claros:

- **Melhoria da Produtividade:** Através de tomadas de decisões mais eficientes (An, 2021), em projetos, com os algoritmos de aprendizado analisando dados e identificando gargalos e sugerindo melhorias. Além de otimizar fluxos de trabalho, alocação de recursos e logísticas, minimizando atrasos e maximizando a utilização dos trabalhadores;
- **Otimização de projetos modular:** Análises referenciais e organizacional de sistemas parametrizados (Kyivska, 2021), analisando opções de projeto para componentes pré-fabricado, minimizando desperdícios e garantindo a compatibilidade

de projeto e produto. Ainda é possível, a otimização de processos de transporte e montagem para a construção modular;

- **Redução dos riscos de projeto:** Visualização e análise de dados em ambiente virtual, que minimiza os riscos futuros em obra, identificando possíveis conflitos de projeto, podendo monitorar, já na fase de uso, a integridade do edifício, permitindo assim, ações preventivas;
- **Segurança:** Na área das estruturas, a IA aumenta a segurança com análises estruturais, otimização estrutural, previsão de aplicações e mecânica dos solos (Doroshenko, 2020). A segurança do canteiro de obra, também pode ser otimizada, através de reconhecimento de imagens, identificando perigos e alertando os trabalhos, evitando assim acidentes;
- **Qualidade:** Melhorando a excelência operacional, particularmente no monitoramento de condições e na gestão de engenharia de diagnóstico (Rao, 2021), com a automatização da inspeção de controle de qualidade, identificando defeitos em materiais e produtos logo no início.
- **Gestão eficaz:** Desde monitoramento de condições e gerenciamento de engenharia de diagnóstico (Rao, 2021), permitindo uma percepção do projeto em tempo real, de forma que os ferentes acompanham o progresso e identifiquem desvios para tomadas de decisões. Ainda é possível, automatizar tarefas repetitivas, como relatórios de progresso e avaliação de riscos.
- **Sustentabilidade:** Analisando dados históricos e fatores ambientais, desde projetos em fase inicial (Smith, 2022) e ao longo de todo o ciclo de vida (An, 2021), otimizando para uma maior eficiência energética e conservação de recursos. Podendo ainda ser avaliado o impacto ambiental do ciclo de vida dos materiais e métodos de construção.

Para além de desafios relacionados aos campos mais gerais de aplicação da IA, incluem questões legais e regulamentares (Parveen, 2019) e riscos jurídicos, financeiros e sociais (Pillai, 2021), um desafio crucial na indústria da construção é a natureza fragmentada que leva a problemas de aquisição e retenção de dados (Regona, 2022), dificultando a aquisição de dados rotulados para aplicações de aprendizagem automática (Xu, 2021).

(Regona, 2022) lista ainda uma série de desafios objetivos que devem ser enfrentados para a implementação da IA na construção.

- Segurança e confiabilidade de dados;
- Falta de padronização de projetos;
- Necessidade de especialização e treino constante de algoritmos para detecção de padrões;
- Incompatibilidade com processos e práticas de construção existentes (mais manual);

(Regona, 2022), ainda apresenta uma relação entre oportunidade e desafios na interface entre inteligência artificial e construção (Figura 12).

A Figura 12, apresenta os potenciais impactos da IA abordando as complexidades de implementação em projetos de construção, descrevendo alguns benefícios que a IA pode trazer

para a construção, como proporcionar uma vantagem competitiva por meio da redução de custos, aumento da produtividade, redução do tempo gasto em tarefas repetitivas e melhoria dos processos de trabalho. Enquanto apresenta os desafios na integração da IA com a construção, como a natureza especializada dos aplicativos de IA, com treinamento constante dos algoritmos, a fragmentação do setor e com isso a escassez de dados, os altos custos iniciais para pesquisa e desenvolvimento de plataformas de IA e a necessidade de um investimento contínuo para manter os dados atualizados.

Opportunities	Challenges
Provide a competitive advantage to businesses that use AI, as it will reduce economic costs	AI applications are highly specialized and need constant algorithms training to identify patterns
Increase productivity and efficiency of on-site personnel	The fragmented nature of the construction industry may result in data scarcity
Reduce the time spent on repetitive tasks by using big data	High initial costs in the research and development of AI platforms
Identify high-risk issues and automatically classify them into actionable categories	AI platforms need investment constantly to keep data up to date
Improve current work processes	Implementation of AI requires businesses to move away from traditional ideas
Increase the consistency in project related work that will result in higher quality	Security and reliability of a large amount of data
Avoid possible delays through predictive modeling	Multi-point responsibility between stakeholders may reduce accountability
Extract data from the complex document and categorize them based on patterns easily	Non-standardization of a construction project makes it difficult to implement AI
Reduce the probability of on-site accidents and mitigate safety risks	Require an AI expert that will involve additional costs
Increase accuracy of plans and allow for better verification	High resistance from industry bodies
Produce outcomes that can be easily understandable by all stakeholders, which enhances efficient communication	Ethical, moral, and legal issues that are yet to be addressed by the government or institutional bodies
Enhance consistency and reliability, as AI is highly unlikely to make mistakes (provided data are correct)	High impact on traditional skills and may impact job availability

Figura 12 - Oportunidades e Desafios da IA na construção Fonte: Ragona 2022

O desenvolvimento de tecnologias de IA na indústria requer distribuição e utilização eficiente de recursos humanos (Heo, 2021), dessa forma é essencial que as empresas de construção ajustem suas estratégias para incorporar IA em sua rede corporativa, identificando e avaliando os processos atuais, construindo uma base de dados, mudando a cultura, com comunicação e treinamento e monitorando, para uma melhoria contínua. É preciso ainda estar atento a segurança dos dados, regulamentações emergentes e éticas do uso da IA e levar em consideração a escala das necessidades.

Ainda que difícil encontrar exemplos de empresas que estejam usando a IA no processo de projeto, por questões de confidencialidade principalmente, alguns escritórios de arquitetura já destacam o crescente uso da IA no projeto arquitetônico, ainda que os detalhes dessa utilização permaneçam desconhecido.

Segundo o diretor do estúdio Zaha Hadid Architects (The Architectural Review, 2012), Patrik Schumacher, o uso de geradores de imagem a partir de prompts textos que descrevem o estilo e as características desejadas, já é usado na empresa. Ele explica como a partir de ferramentas como DALL-E 2 e Midjourney, serão geradas ideias em projetos iniciais e de concurso, de modo a auxiliar a exploração de conceitos. A empresa, já possui uma equipe de pesquisa dedicada a IA defendendo o investimento com uma abordagem aberta e autorregulada. Apesar da utilização, pelo Zaha Hadid Architects ter gerado críticas, Schumacher defende que as ferramentas de IA estão democratizando o acesso ao design, permitindo que arquitetos explorem ideias com mais rapidez e facilidade.

Tim Fu, outro renomado designer, que trabalhou no escritório de Zaha Hadid, com especialização em computação avançada e inteligência artificial, fundou um escritório de arquitetura, com foco na IA generativa em projeto arquitetônico. Segundo Tim, “a IA pode implementar rapidamente conceitos em visualização imediata, otimizar os parâmetros necessários e, finalmente, automatizar para BIM e documentação de construção; a partir daí, a automação e a robótica assumirão o controle da construção” (Parametric Architecture, 2023).

A ICON Building Solutions (Icon Build, 2023), empresa focada no desenvolvimento de tecnologias para construção, utiliza a IA para supervisionar o processo de impressão 3D para construção, gerenciando os parâmetros de impressão em tempo real, ajudando o fluxo de material e os caminhos de impressão, de modo a otimizar o processo.

A SoLa Impact, (Building, 2023) principal incorporadora privada da Califórnia em habitação a preços acessíveis, se junto a Zenerate, startup de Proptch AI, que utiliza design generativo, IA e análises avançadas de aprimoramento no processo de viabilidade imobiliário, para acelerar os processos de planejamento, projeto, configuração e aprovação para uma série de projetos habitacionais da SoLa.

A Zenerate (Figura 13), desenvolveu ainda, um aplicativo de estudo de viabilidade para Habitação a partir de módulos. Com dados de input, é possível gerar opções de design, realizar avaliações financeiras e otimizar os resultados do projeto (Building, 2023).

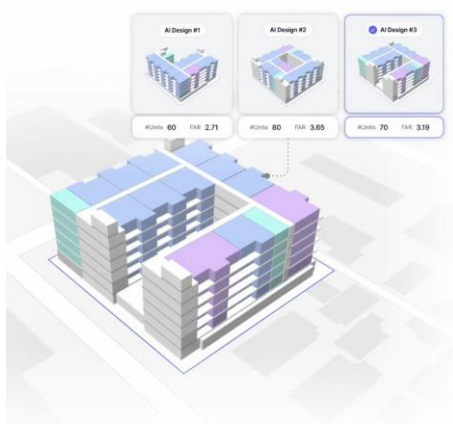


Figura 13 - Zenerate Modular

A Skanska, outra empresa de construção dos EUA, integrou ferramentas de otimização de recursos baseados em IA, para aumentar a precisão no cálculo dos materiais e da força de trabalho. Com o foco em evitar encomendas excessivas e subutilização dos materiais.

Project Phoenix é um empreendimento habitacional modular com 316 unidades na Califórnia, em uma integração entre a MBH Architects, Factory OS e Autodesk (Figura 14), o projeto se destaca pelo uso de design generativo e uso de IA para criar moradias sustentáveis de forma rápida e eficiente.

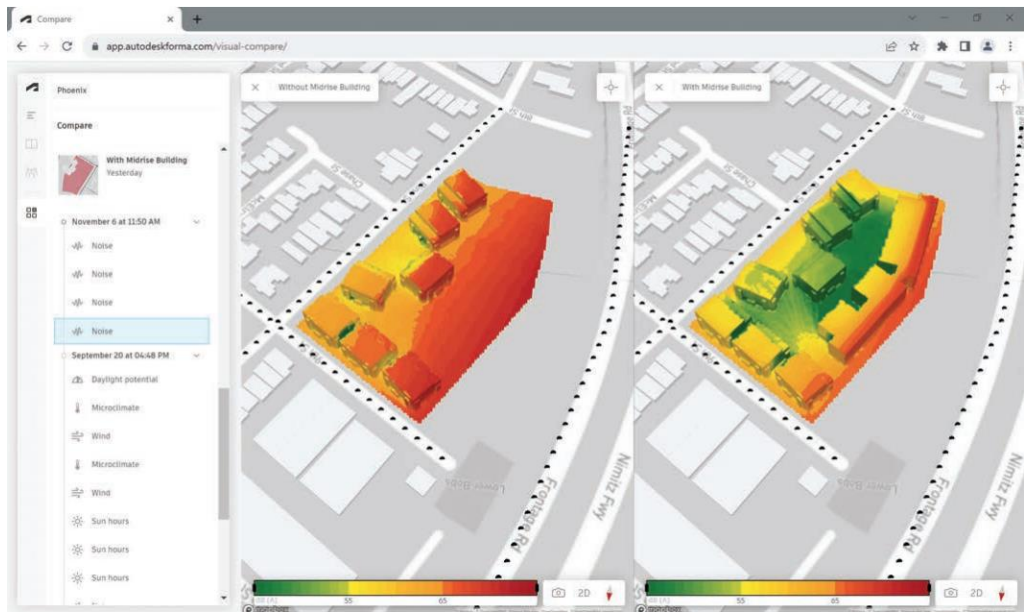


Figura 14 - Análise de impacto ambiental do projeto Phoenix no Autodesk Forma Fonte: RIBA

Como resultado, o projeto será construído com cerca de metade do custo, do tempo e da pegada de carbono de um edifício multifamiliar corrente da região.

O Relatório de Inteligência Artificial de 2024 do (RIBA, 2024), explora as implicações da IA na prática arquitetônica e na profissão, o relatório revela ainda, que 41% dos arquitetos no Reino Unido, já utilizam a IA para pelo menos algum projeto, e entre eles, 43% acreditam que tornou o processo de projeto mais eficiente. Na Tabela 3**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é possível perceber como as empresas estão aplicando o uso da IA.

Empresa	Aplicação	Ferramenta
Zaha Hadid Architects	Imagens iniciais para estudo de concepção do Design	DALL-E, Midijourney
Tim Fu	Automação de projeto no BIM	Algoritmos de IA Generativa
ICON Building Solutions	Supervisionar processos de impressão 3D	Não divulgado
Sola Impact/Zenerate	Estudo de viabilidade	Design Generativo de IA

Tabela 3 - Empresas e principais aplicações da IA. Fonte: Autora

O setor de construção passa por uma revolução digital impulsionada pelas novas tecnologias, já muito presentes em indústrias correntes, como a IA. O BIM, atua como uma plataforma digital de integração dos dados de projeto, engenharia e construção. Alinhado a outras tecnologias digitais de automação, como a parametrização, a IA busca aprimorar a produtividade, otimizando projetos e reduzindo os riscos, podendo estar presente em todas as etapas de projeto, da concepção ao ciclo de vida do edifício.

Na construção modular e dentro dos princípios do DfMA, tais tecnologias apresentadas se maximizam, com abordagens que enfatizam a padronização e a industrialização. Um exemplo refere-se ao design paramétrico, que permite a criação de variações dentro de um conjunto de regras definidas, ideal para padronizar os componentes modulares. Os modelos paramétricos, podem ser alimentados pela IA permitindo a exploração de uma gama ampla de opções de projeto modular dentro de critérios estabelecidos.

Para isso, se torna fundamental a padronização de processos e a troca de dados entre as fases de projeto, construção e fabricação.

3

ESTUDO DE CASO

3.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria da construção civil tem testemunhado uma revolução impulsionada pela integração da tecnologia (Akinosho, 2020) e inovação no processo de design e fabricação. Entre as diversas abordagens emergentes, o design paramétrico ganha destaque como uma poderosa ferramenta na otimização de projetos de construção modular. Este método permite a criação de modelos que atendem a requisitos específicos, variando conforme parâmetros predefinidos (Khamis, 2022), e oferece significativos avanços na automação (Borhani, 2018) do processo de projeto.

A capacidade de estes sistemas integrarem IA e algoritmos complexos permite uma análise detalhada das variações de projeto (Borhani, 2018) e a identificação de soluções ideais (Gilner, 2019), levando a uma eficiente exploração das possibilidades formais (Brown, 2020) e funcionais de um edifício. Dessa forma, as variáveis paramétricas tornam-se essenciais para definir dimensões, formas e materiais (Gu, 2021), bem como suas interações, possibilitando a criação de componentes modulares otimizados tanto em termos de configuração quanto de montagem (Yuan, 2018).

Esta tese visa, desenvolver e aplicar princípios de design paramétrico em um contexto de construção modular. A proposta é apresentar uma abordagem que integra algoritmos de IA e algoritmos genéticos no projeto de edifícios modulares, fornecendo uma base sólida para a inovação na indústria da construção, através de software BIM. A colaboração com empresas e a utilização de projeto modelo reforçam a relevância e aplicabilidade deste estudo, de modo a contribuir para o avanço da construção modular.

3.2. ENQUADRAMENTO DO PROJETO

3.2.1. DESIGN PARAMÉTRICO

O design paramétrico desempenha um importante papel na otimização de projeto de construção modular. Na busca pela automação, o design paramétrico, cumpre os requisitos impostos à concepção formal do projeto, apoiando o processo de concepção, através de variações de projeto.

Os modelos paramétricos, podem ainda, integrar algoritmos de IA, de modo a analisar as variações de projeto geradas e identificar aquelas que atendam a critérios específicos solicitados. Isso permite que a IA oriente a exploração do projeto em direção a soluções ideais.

O projeto paramétrico é uma excelente ferramenta para definição de componentes modulares e suas interações. Ao parametrizar os componentes modulares, a IA é capaz de otimizar seu tamanho, configuração e conexões para uma melhor montagem, reduzindo desperdícios e melhorando os resultados gerais de fabricação do projeto.

Embora o *parametrismo* tenha suas raízes nas técnicas de animação digital em meados da década de 1990, ele só emergiu plenamente nos últimos anos. Com o desenvolvimento de sistemas avançados de design paramétrico (Baltus, 2019) e ferramentas de projeto computacional, que ajudaram a estabelecer uma ligação entre a modelagem paramétrica e a simulação, possibilitando analisar os diversos aspectos de uma edificação ao longo do tempo.

O design paramétrico é uma ferramenta valiosa para customização de produtos e design generativo, permitindo o rápido desenvolvimento de novas variantes de produtos (Trautmann 2021), impactou significativamente os projetos de arquitetura e restauro (Cruz-Ramírez, 2019). No contexto de espaços interiores, é utilizado para explorar dimensões estéticas e criar designs únicos (Farouk, 2019) em projetos de restauro, pode ser utilizado para reproduzir ou modificar formas existentes (Cruz-Ramírez, 2019) e no campo da arquitetura dinâmica, o projeto paramétrico está sendo utilizado como ferramenta de modelagem de informações para treinar especialistas em construção (Cook, 2024). Tem sido particularmente influente no desenvolvimento de produtos arquitetônicos contemporâneos, permitindo o controle de vários critérios de projeto e a reinterpretação de formas arquitetônicas tradicionais.

No entanto, existem preocupações sobre o potencial do design paramétrico se concentrar excessivamente na manipulação de formas e a necessidade de uma sólida formação intelectual na sua aplicação (Baltus, 2019). O surgimento de projetistas paramétricos na indústria da construção levou à necessidade de uma compreensão mais profunda do seu papel e das considerações que devem fazer (Niphadkar, 2022). Apesar destas preocupações, a integração do design paramétrico na educação arquitetônica é vista como uma competência valiosa, especialmente quando combinada com conhecimentos de integridade estrutural, tolerância de materiais e sustentabilidade (Riekstins, 2018).

Modelos paramétricos, são representações matemáticas usadas em vários campos, incluindo arquitetura, engenharia e construção. Eles definem as relações entre diferentes variáveis de projeto (Baltus, 2019). Ao ajustar essas variáveis, são geradas automaticamente inúmeras variações de projeto. As variáveis, são os blocos fundamentais de um modelo, eles podem representar dimensões, formas, materiais e outras propriedades. Já a relação, define como as variáveis estão conectadas e como a alteração de uma variável afeta as outras.

No geral, o design paramétrico é uma ferramenta versátil e poderosa que está transformando vários aspectos do design e da arquitetura. (Graciano, 2020) discute o uso de algoritmos e parâmetros variáveis em design paramétrico e generativo, categorizando ainda mais essas abordagens em representação da forma, otimização e descoberta, enquanto (Trautmann, 2021) enfatiza a adaptabilidade e capacidade de resposta de modelos paramétricos na exploração

de design e customização de produtos. O design paramétrico abrange vários tipos de parametrização, incluindo métodos explícitos, implícitos e generativos (Trautmann, 2021) e geometrias complexas, integrando técnicas de avaliação e otimização de desempenho (Farouk, 2019). Através do uso de algoritmos, permite a entrada dinâmica de valores de variáveis (Graciano, 2020), criando projetos sistemáticos, adaptativos e dinâmicos (Romaniak, 2018). A base teórica do design paramétrico reside na sua abordagem algorítmica de regras e na geração de múltiplas soluções que pode ter um impacto significativo na arquitetura (Gu, 2021). (Li, 2020) concentra-se na aplicação de design paramétrico generativo na criação de modelos robustos e na especificação de formas, respectivamente. Por último, (Higashi, 2000) propõe um método de projeto paramétrico baseado em restrições topológicas e geométricas.

O design generativo, em particular, tem sido aplicado em vários campos, incluindo design mecânico e arquitetura, para acelerar o processo de design e aumentar a criatividade (Seff, 2021). No entanto, o uso de ferramentas generativas no projeto paramétrico pode exigir uma mudança na forma como os procedimentos de projeto são representados (Ginosar, 2018), desempenhando um papel crucial nos processos de design sistemáticos, adaptativos e dinâmicos em arquitetura (Romanak, 2018). Existem diversas técnicas de parametrização, explícitas, implícitas e generativas, cada uma com características e aplicações distintas. A parametrização explícita envolve a definição de valores específicos para elementos de design, enquanto a parametrização implícita usa algoritmos para atribuir valores dinamicamente. A parametrização generativa, por outro lado, emprega algoritmos para criar uma gama de soluções de design baseadas em parâmetros definidos (Graciano, 2020).

Os modelos paramétricos são normalmente representados como fluxogramas ou árvores de decisão. Eles ilustram as relações entre as variáveis de projeto e a geometria resultante, são compostos por:

- **Variáveis de entrada:** Estes são os parâmetros iniciais do projeto que o usuário define. Podem ser propriedades geométricas, como dimensões, ângulos, ou mesmo propriedades não geométricas, como tipos de materiais ou cargas.
- **Regras e Relacionamentos:** Definem como as variáveis de entrada estão inter-relacionadas e como afetam a geometria do modelo. Podem ser equações matemáticas, declarações lógicas ou restrições geométricas.
- **Geometria de Saída:** Esta é a forma final do modelo que é gerado com base nas variáveis de entrada e nas regras aplicadas.

Os designs paramétricos dependem de relações matemáticas e algoritmos para definir a forma e o comportamento do design. Em vez de manipular diretamente a geometria, os designers estabelecem regras e lógicas que determinam como os elementos do design interagem e se adaptam. Esses algoritmos incorporam parâmetros, que são essencialmente variáveis que controlam diferentes aspectos do design. Ao ajustar esses parâmetros, os designers podem explorar uma ampla gama de variações e otimizar o design para fins específicos.

Alguns princípios para implementação do design paramétrico são essenciais:

- **Base algorítmica:** Em sua essência, o design paramétrico se baseia em algoritmos, que são essencialmente conjuntos de regras que definem as relações entre os elementos do

design. Esses algoritmos usam parâmetros (variáveis) que podem ser ajustados para modificar dinamicamente o design. (Cudzik, 2019; Gu, 2020)

- **Relações paramétricas:** Com base no conceito de algoritmos, o design paramétrico estabelece conexões entre os elementos do design por meio de fórmulas e equações. Quando um parâmetro é alterado, essas relações garantem que todos os elementos conectados sejam atualizados automaticamente, mantendo a consistência do projeto. (Graciano, 2020)
- **Controle dinâmico:** O design paramétrico dá aos designers a capacidade de fazer ajustes em tempo real no design modificando os parâmetros. Isso permite a exploração de um vasto espaço de design e a rápida iteração de ideias. (Farouk, 2019; Trautmann, 2021)
- **Exploração generativa:** Ao permitir o controle dinâmico, o design paramétrico facilita a geração de inúmeras variações de design com base em ajustes de parâmetros. Isso permite que os projetistas explorem uma gama mais ampla de possibilidades e identifiquem soluções ideais que atendam a critérios específicos.
- **Integração com a análise de desempenho:** O software de projeto paramétrico pode ser integrado a ferramentas que analisam fatores como integridade estrutural, eficiência energética e impacto ambiental. Isso permite que os projetistas não apenas explorem a estética, mas também otimizem o projeto para o desempenho. (Farouk, 2019)
- **Compatibilidade com a fabricação digital:** Os modelos paramétricos podem ser perfeitamente vinculados a fluxos de trabalho de fabricação digital, como impressão 3D ou fresagem CNC. Isso traduz a intenção do projeto diretamente em instruções de construção, reduzindo erros e simplificando o processo. (Gu, et al., 2020)

Em essência, um design paramétrico não é apenas um modelo digital estático, mas um sistema dinâmico orientado por algoritmos e parâmetros. Isso permite um processo de design mais interativo, eficiente e orientado para o desempenho, com potencial para soluções inovadoras e complexas.

Os modelos paramétricos podem fornecer dados de projeto para ferramentas de fabricação automatizadas, como impressoras 3D e máquinas CNC, que são fundamentais para os fluxos de trabalho da Indústria 4.0. (Aftab, 2023), (Reisinger, 2020) e (Leone, 2021) demonstram o uso de modelagem paramétrica para otimização estrutural, com Reisinger focando em edifícios industriais e Leone em painéis de sombreamento.

(Naumov, 2022) e (Semochkin, 2022) discutem o desenvolvimento e a aplicação de elementos de biblioteca paramétrica e métodos de modelagem de informações de construção, respectivamente, para melhorar a eficiência do projeto. enquanto (Nordestgaard, 2019) destaca a adaptabilidade do design paramétrico em projetos com mudanças frequentes, confirmando a importância da modelação paramétrica para o avanço da indústria da construção no contexto da Indústria 4.0.

A transparência paramétrica é alcançada no planejamento de fábrica baseado em modelo por meio da explicação de dependências paramétricas (Burggräf, 2021), também aumenta a eficácia e a eficiência da produção na indústria da construção (Thajudeen, 2020) explora o potencial da modelagem paramétrica para design eficiente de recursos e plataformas de produtos flexíveis, respectivamente.

A parametrização é um aspecto crucial do desenvolvimento do projeto, variando a sua implementação nas diferentes fases. (Graciano, 2020) enfatiza a importância da parametrização

no processo inicial de projeto, com a necessidade de um processo de iniciação de projetos organizando os requisitos.

A implementação da parametrização no processo inicial de design é crucial por várias razões. Permite a automatização da obtenção de parâmetros das peças, garantindo consistência e eficiência no processo de projeto e fabricação (Shchekin, 2019). O design paramétrico baseado em dados permite fluxos de trabalho personalizados e exploração antecipada do espaço de design, melhorando o envolvimento com objetivos quantitativos de design (Brown, 2020). Projetos de design paramétrico e generativo, que utilizam algoritmos para atribuir dinamicamente valores variáveis aos parâmetros, podem levar a um maior número de soluções possíveis (Graciano, 2020). O processo de projeto paramétrico em arquitetura pode auxiliar na tomada de decisões e na conversão de conceitos de projeto em desenhos de execução (Khamis, 2022), uma abordagem integrada para modelar e analisar dependências entre parâmetros de engenharia na fase inicial do projeto pode ser útil para projetistas (Bashir, 2020), pode ainda facilitar o desenvolvimento orientado para o utilizador, particularmente na fase de pré-projeto (Canestrino, 2021), (Reshetnikova, 2020) destaca ainda os benefícios da parametrização na fase de projeto preliminar, na modelagem geométrica de instalações de engenharia e no projeto de máquinas industriais.

O papel de um projetista paramétrico é controlar, desenvolver e compartilhar informações geométricas dentro da equipe de projeto, utilizando software paramétrico disponível comercialmente (Niphadkar, 2022), como Grasshopper ou Dynamo.

(Mohammadi, 2019) explora o uso da parametrização na etapa de execução apresentando um método para construção de um modelo de simulação em tempo real com parâmetros ajustáveis fornecendo recomendações metodológicas para sua aplicação na resolução de problemas geométricos, sendo crucial, por exemplo, para estimativa de custos (Ji, 2019), modelagem orçamentária (Gorbunov, 2021) e gestão da qualidade (Abazid, 2019). Também desempenha um papel significativo na otimização de parâmetros organizacionais e tecnológicos (Lapidus, 2020), na gestão de processos de fiscalização (Alice, 2020), na medição de desempenho (Zamim, 2021) explorando a seu potencial generalização no planeamento da cadeia de abastecimento, enquanto (Guimarães, 2020) destaca a importância da compatibilidade dos projetos.

Na construção modular, o design paramétrico atua como um facilitador (Banihashemi et al., 2018) para a otimização do projeto, reforçando a eficiência do projeto (Yuan, 2018), redução de desperdício, montagem mais rápida através de conexões otimizadas e com uma comunicação aprimorada (Lu, 2020) entre projetista, engenheiros e fabricantes.

Os modelos paramétricos permitem definir com precisão a geometria, materiais e propriedades de unidades modulares, garantindo qualidade consistente e produção em massa (Yuan, 2018), o definir os principais aspectos do design como variáveis (dimensões, configurações, materiais), o design paramétrico permite a geração de inúmeras opções de design modular (Banihashemi et al., 2018).

Embora a construção modular priorize a padronização, conforme destacado por (Choi, 2019), (Musa, 2018) e (Abdulla, 2022), o projeto paramétrico, como discutido por (Banihashemi et al., 2018), (Canestrino, 2021) e (Cruz-Ramírez, 2019), permite explorar as possibilidades de projeto dentro dessas restrições. Além disso, (Yuan, 2018) mencionam que o projeto paramétrico pode ajudar a otimizar o tamanho e o peso dos módulos para transporte e manuseio no local.

Em geral, o design paramétrico oferece uma estrutura poderosa para otimizar os projetos de construção modular (Banihashemi et al., 2018), permitindo uma exploração orientada por dados das opções de design (Gu, 2018), o que resulta em edifícios modulares mais eficientes, econômicos e adaptáveis.

Devido à padronização, a construção modular pode ter limitações na obtenção de formas de construção altamente personalizadas ou orgânicas. O design paramétrico pode ajudar a explorar as possibilidades dentro dessas limitações.

(Banihashemi et al., 2018) e (Greenough, 2019) demonstram o potencial de integração na redução do desperdício de construção e na melhoria do fluxo de trabalho de projeto na construção modular, com (Teschemacher, 2023) aprimorando ainda mais essa integração, com regras de coordenação modulares em ferramentas de autoria BIM e aplicando análises estruturais nos módulos. (Tee, 2018) destaca a necessidade de integração de práticas para complementar projetos modulares e o potencial de combinar processos paramétricos e combinatórios em projeto e fabricação, enquanto (Fuchkina, 2018) propõe uma abordagem modular para explorar grandes conjuntos de variantes de design em modelos paramétricos. (Banihashemi et al., 2018) estendem a parametrização ao uso de inteligência artificial e coordenação modular para aprimorar ainda mais os processos de design, sublinhando os benefícios e desafios da integração do design paramétrico na coordenação modular, e a necessidade de mais investigação nesta área.

O design paramétrico, é ainda um componente-chave da entrega integrada de projetos (IPD), permitindo métodos de trabalho colaborativos e tecnologia de informação e comunicação podem facilitar isso criando um modelo central onde todas as partes podem ver como as mudanças em um aspecto afetam outros aspectos (Borhani, 2018) com o uso do Building Information Modeling (BIM) aumentando ainda mais a eficácia do IPD ao integrar o projeto e o planejamento da produção, permitindo consideração de restrições do mundo real, como custo e tempo, levando a projetos mais viáveis.

O modelo paramétrico, serve como centralizador de informações, permitindo que todos os profissionais envolvidos, possam definir requisitos de concepção de um projeto, permitindo uma exploração e comunicação eficiente em todo o processo. Para projetos integrados, o design paramétrico apresenta-se como uma ferramenta facilitadora a colaboração e garantindo que todos os aspectos do projeto sejam considerados desde a fase de concepção.

O uso de sistemas paramétricos permite a otimização de soluções por meio do conhecimento interdisciplinar, especialmente em estágios iniciais de design. Além disso, o design paramétrico facilita a geração e seleção de variações durante o processo paramétrico, o que auxilia equipes multidisciplinares na identificação de problemas e na tomada de decisões. Também promove a colaboração entre arquitetos e outros especialistas, como engenheiros estruturais e analistas de desempenho, para a otimização do design. Em resumo, o design paramétrico promove a colaboração ao permitir a geração de soluções complexas e dinâmicas, bem como a integração de diferentes especializações para a otimização do design (Gu, 2018).

A utilização da parametrização, na indústria da arquitetura e construção, está relacionada com a área de aplicação, na de restauro pode ser usada para reproduzir e modificar formas existentes (Cruz-Ramírez, 2019), enquanto na arquitetura para integrar técnicas de avaliação de desempenho

e otimização (Farouk, 2019) e no processo de design para explorar as múltiplas possibilidades e complexidades formais. Na construção, o projeto paramétrico pode melhorar a qualidade, a diversidade e o tempo de projeto (Li, 2019), também é utilizado em geometria integrada ao design auxiliado por computador e na customização de produtos e design generativo (Trautmann, 2021).

De forma geral, podemos salientar que a parametrização busca:

- **Explorar várias soluções de design:** Investigar uma gama mais ampla de opções de projeto manipulando variáveis e critérios (Farouk, 2019; Trautmann, 2021).
- **Otimizar o desempenho do projeto:** Analisar e melhorar vários aspectos do projeto, como iluminação, ventilação, acústica e estrutura (Farouk, 2019).
- **Controlar a geometria dinamicamente:** Manipular com precisão formas e componentes para atender perfeitamente às necessidades do projeto (Nasir, 2023).
- **Gerar formas inovadoras:** Facilitar a exploração de formas e estruturas inovadoras, expandindo as possibilidades de design (Gu, 2018).
- **Aprimorar a colaboração:** Melhorar a comunicação e a interação entre arquitetos, engenheiros e fabricantes por meio de um modelo paramétrico compartilhado (Cudzik, 2019).
- **Reduzir os erros de projeto:** Minimizar os erros automatizando tarefas repetitivas e garantindo a consistência em todo o processo de design (Graciano, 2020).

O processo de projeto paramétrico em arquitetura envolve uma série de etapas, desde a concepção até a execução, utilizando ferramentas como Grasshopper, Revit e Simplify 3D (Khamis, 2022). Esse processo é caracterizado por três processos de tomada de decisão: conclusivo, confirmativo e *simulativo*, que podem potencializar a criatividade. O papel do designer paramétrico nesse processo é controlar, desenvolver e compartilhar informações geométricas (Niphadkar, 2022).

Na Figura 15, (Khamis, 2022) apresenta um fluxograma que mostra um processo de projeto da execução para fabricação. O processo começa com o uso do Grasshopper, uma linguagem de programação visual para o Rhino, para definir o conceito inicial do projeto. A partir daí, o script faz interface com o Rhino, um software de modelagem 3D.

(Khamis, 2022), demonstra no fluxograma (Figura 15), dois caminhos possíveis: Um caminho mostra que o modelo é otimizado e enviado ao software BIM (Building Information Modeling) para produzir desenhos de execução. O outro caminho mostra que o modelo passa por um processo de exploração e avaliação antes de ser enviado ao BIM para a produção de desenhos de execução.

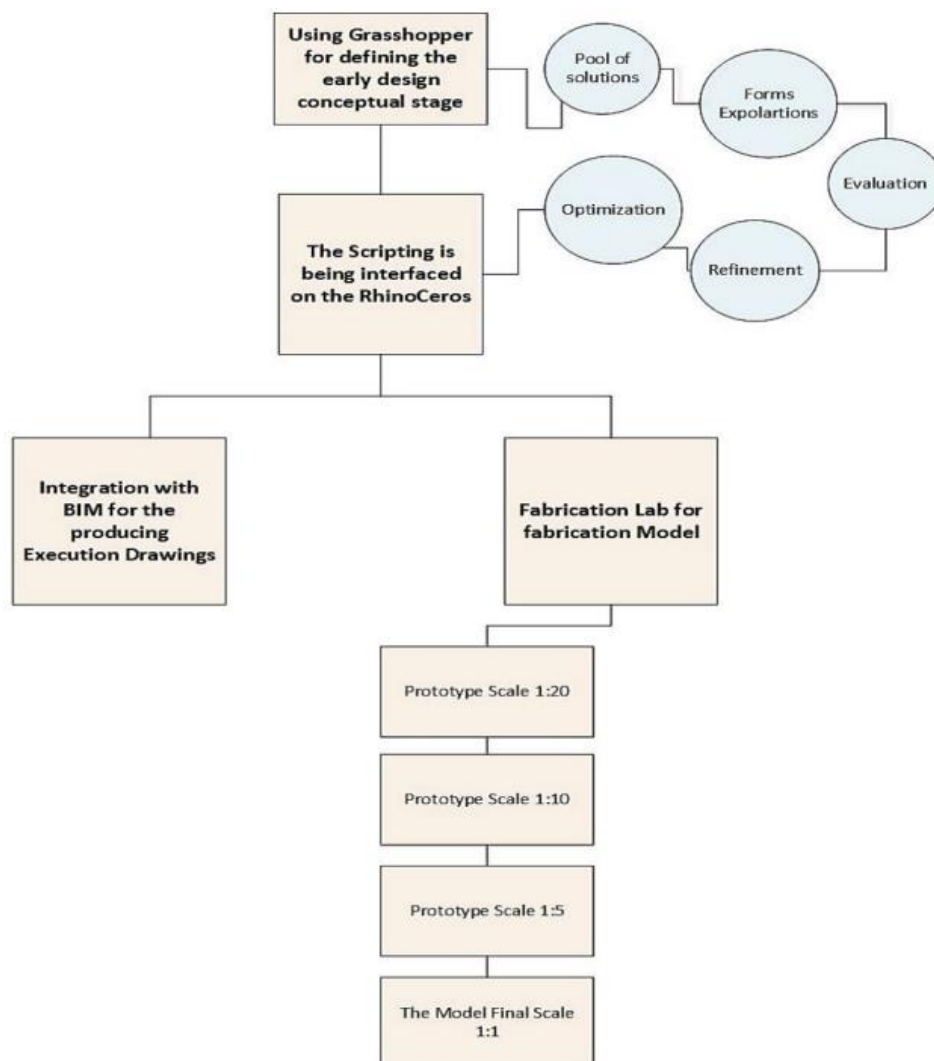


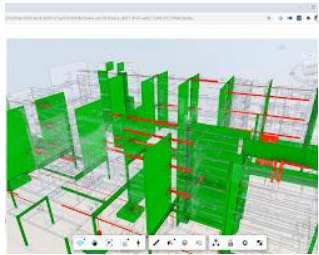
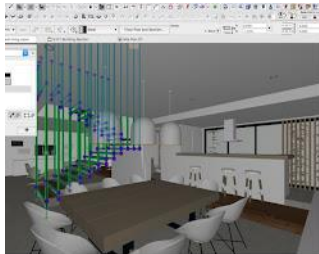
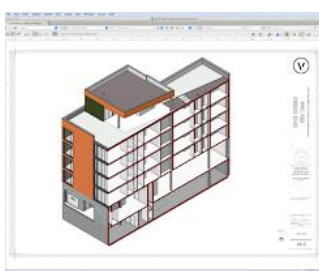
Figura 15 - O fluxo de trabalho para um conceito de projeto paramétrico até a fabricação. (Khamis, 2022)

(Aftab, 2023) e (Bassir, 2023) destacam o potencial, para organizar, do Grasshopper e da inteligência artificial (IA) para melhorar a eficiência e a precisão dos fluxos de trabalho do Building Information Modeling (BIM). O trabalho de Aftab se concentra na automatização de operações de digitalização para BIM usando Grasshopper demonstrando as melhorias de eficiência e precisão que podem ser alcançadas através da automação usando o Grasshopper, enquanto (Bassir, 2023) analisa a aplicação de IA e aprendizado de máquina em BIM, particularmente em controle de qualidade e manutenção preditiva. (Aftab, 2023) apresentando um método automatizado para modificar e avaliar dados de nuvem de pontos.

(Greenough, 2019) concentra-se na integração do projeto computacional, utilizando ferramentas como Dynamo e Grasshopper, para melhorar o fluxo de trabalho do projeto, enquanto (Alwisy, 2019) apresenta uma metodologia sistemática para automatizar o projeto e o desenho para a fabricação de painéis de madeira. (Chong, 2019) vai um passo além, propondo um método de simulação de jogos para apoiar a automação da construção na construção modular, que poderia ser potencialmente integrado ao BIM e à tecnologia robótica.

O Grasshopper, um software de programação visual, é amplamente utilizado na engenharia estrutural por sua capacidade de simular variantes de projeto com mínimo esforço (Ajouz, 2021). Rhino, uma ferramenta paramétrica, é comumente usada em projetos arquitetônicos por sua capacidade de criar geometrias complexas e estruturas responsivas (Mohol, 2023). O surgimento de designers paramétricos na arquitetura está impulsionando o desenvolvimento de novas estratégias para design paramétrico (Niphadkar, 2022), já o SketchOpt, um sistema de recuperação de modelos paramétricos baseado em esboços, permite a geração de modelos paramétricos a partir de esboços básicos de plantas baixas (Keshavarzi, 2020). Softwares de código aberto para modelagem e análise de estruturas oferecem acessibilidade e flexibilidade (Tsvetkova, 2020).

Na Tabela 4, é apresentado principais ferramentas e softwares:

Ferramenta	Descrição	Imagem
Autodesk Revit	Software BIM (Building Information Modeling) líder do mercado, utilizado para projetos de arquitetura e engenharia. O Revit oferece recursos paramétricos poderosos para criação de modelos 3D inteligentes e documentação completa do projeto.	
Archicad	Software BIM desenvolvido pela Graphisoft, com foco em arquitetura. O Archicad oferece ferramentas intuitivas para modelagem paramétrica e geração de documentação, além de integração com outros softwares BIM.	
Vectorworks Architect	Software CAD 2D/3D com recursos paramétricos para arquitetura e paisagismo. O Vectorworks oferece ferramentas para modelagem precisa, documentação e renderização, além de integração com BIM.	

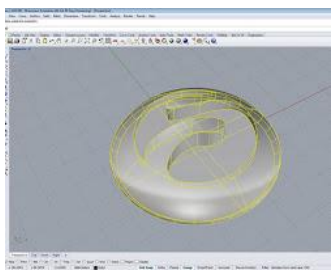
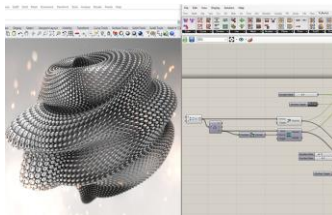
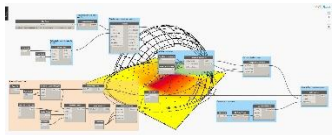
Rhinoceros 3D	Software de modelagem 3D versátil com curva de aprendizado mais complexa. O Rhinoceros permite modelagem paramétrica através de plugins como Grasshopper.	
Grasshopper	Plugin para Rhinoceros 3D que permite criar modelos paramétricos complexos através de uma interface visual de programação. O Grasshopper é uma ferramenta poderosa para arquitetos que desejam explorar a geração de formas complexas e otimizar seus projetos.	
Dynamo	Plugin para Revit que permite criar scripts visuais para automatizar tarefas e realizar modelagem paramétrica. O Dynamo é uma ferramenta útil para arquitetos que desejam ampliar as funcionalidades do Revit e integrar com outros softwares.	

Tabela 4 - Principais Softwares e Ferramentas. Fonte: Autora

Outras plataformas online que permitem explorar diferentes opções de design paramétrico através de interfaces intuitivas populares incluem Autodesk Within, DesignBuilder e Spacemaker. Enquanto usuários com habilidades de programação podem desenvolver seus próprios algoritmos e scripts para automatizar tarefas e criar modelos paramétricos personalizados.

Na Figura 16, apresenta-se um exemplo de processo de projeto paramétrico para construção modular usando os softwares ArchiCAD, Grasshopper e Rhino. As ferramentas paramétricas integradas do ArchiCAD permitem explorar as configurações dos componentes modulares com base nos parâmetros definidos anteriormente. Ao analisar as diferentes opções geradas, é possível tomar decisões sobre o design modular mais adequado para o projeto (Banihashemi et al., 2018). Enquanto no Grasshopper (Aftab, 2023) é possível explorar as variações e relações da composição de módulos. O software permite definir os pontos de conexão e a lógica de montagem entre os componentes parametrizados. Em seguida, no Archicad, são gerados desenhos detalhados e documentos de construção para concluir o processo de projeto de construção modular.

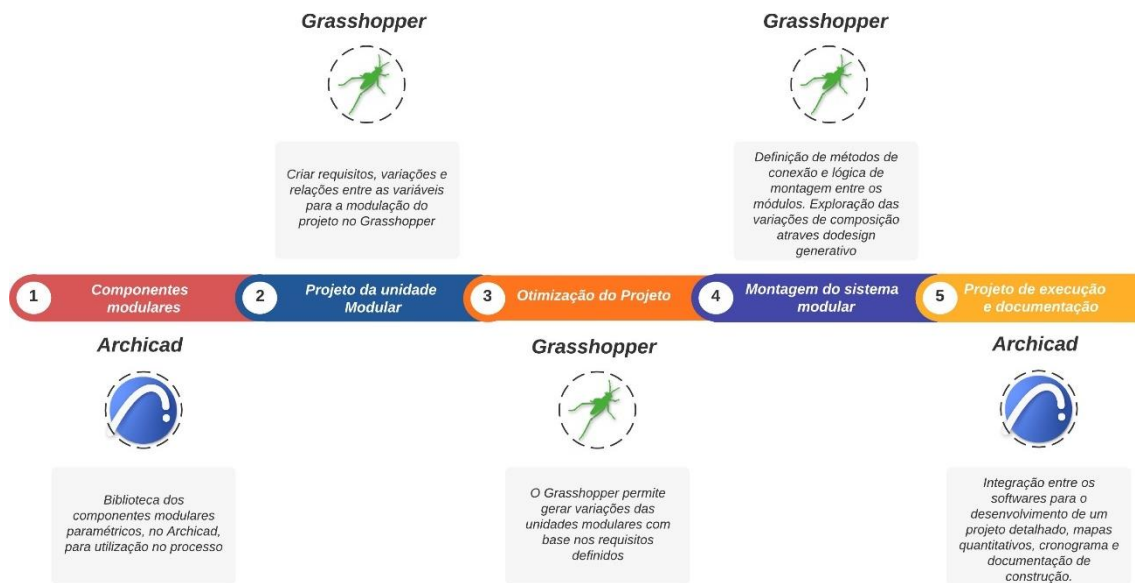


Figura 16 - Exemplo de fluxograma de Projeto Paramétrico para construção modular. Fonte: Autora

De modo geral, o fluxograma destaca como o projeto paramétrico pode ser aproveitado em todo o processo de construção modular, começando com o ArchiCAD e, potencialmente, incorporando o Grasshopper e o Rhino para maior exploração e otimização do projeto.

(Nasir, 2023) e (Niphadkar, 2022) destacam a complexidade e a natureza demorada do processo, com Nasir também enfatizando a necessidade de equilibrar as capacidades tecnológicas e os fatores ambientais, já (Daher, 2019) e (Riekstins, 2018) observam as limitações do projeto paramétrico, incluindo seu uso exclusivo por especialistas e empresas de grande porte, e a necessidade de conhecimento adicional em áreas como integridade estrutural e sustentabilidade, para integrar funcionalidades avançadas e design baseado em dados para otimizar o desempenho do edifício (Brown, 2020), enquanto (Borhani, 2018) ressalta a necessidade de um fluxo de trabalho padronizado e da integração das informações da construção ao processo de projeto.

Principais Desafios da Implementação do Design Paramétrico na Arquitetura e Construção:

- Complexidade Técnica e Curva de Aprendizado:
 - Domínio de ferramentas paramétricas exige alto nível de conhecimento técnico e habilidades computacionais (Frangedaki, 2022).
 - Curva de aprendizado íngreme pode ser um obstáculo para iniciantes e profissionais sem experiência prévia com modelagem paramétrica (Niphadkar, 2022).
- Interoperabilidade entre Softwares:
 - Dificuldade na integração de diferentes softwares e sistemas de diversas plataformas, como CAD, BIM e ferramentas de modelagem paramétrica (Elshani, 2022).
 - Falta de padronização nos formatos de dados e interfaces de comunicação dificulta a troca de informações e a colaboração entre equipes (Frangedaki, 2022; Niphadkar, 2022).
- Aspectos Organizacionais:
 - Impacto no fluxo de trabalho e nas estruturas organizacionais existentes, exigindo adaptação de processos e treinamento de funcionários (Stals, 2022).

- Custos adicionais com softwares, hardwares e treinamentos podem representar um obstáculo para empresas de menor porte.
- Considerações de Desempenho e Sustentabilidade:
 - Necessidade de conhecimento em áreas como integridade estrutural, eficiência energética e sustentabilidade para garantir o desempenho adequado do edifício (Daher, 2019).
 - Desafios na otimização do desempenho do edifício e na minimização do impacto ambiental, especialmente em projetos de grande escala ou com complexas geometrias (Riekstins, 2018).
- Limitações de Acesso e Conhecimento:
 - Uso predominante por especialistas e grandes empresas com recursos para investir em softwares, hardwares e treinamento especializado (Daher, 2019; Riekstins, 2018).
 - Falta de familiaridade com o design paramétrico entre a maioria dos profissionais da construção civil, limitando sua adoção em projetos de menor escala ou com equipes menos experientes.
- Papel dos Projetistas Paramétricos:
 - Necessidade de uma compreensão profunda do papel e das responsabilidades dos projetistas paramétricos, que atuam como pontes entre o design conceitual e a implementação técnica (Niphadkar, 2022).
 - Falta de clareza sobre as funções e o impacto do design paramétrico na indústria, exigindo maior definição de responsabilidades e um melhor entendimento do valor agregado que esses profissionais podem oferecer.
- Educação em Arquitetura Paramétrica:
 - Integração do design paramétrico nos currículos de arquitetura para preparar os futuros profissionais para os desafios e oportunidades dessa área.
 - Necessidade de treinamento adicional para profissionais em exercício, atualizando suas habilidades e conhecimentos para acompanhar os avanços tecnológicos e as demandas do mercado (Canestrino, 2021).
- Padronização e Integração de Informações:
 - Falta de um fluxo de trabalho padronizado para o design paramétrico, dificultando a replicação de boas práticas e a colaboração entre equipes (Borhani, 2018).
 - Dificuldade na integração de informações da construção, como dados de materiais, custos e prazos.

Os modelos paramétricos permitem a exploração de várias configurações para encontrar soluções que otimizem aspectos como facilidade de montagem, integridade estrutural ou eficiência energética dentro do sistema modular. (Al-Azzawi, 2021) e (Teschmacher, 2023) reconhecem a importância da padronização para a produção em massa na construção modular. Enquanto o projeto paramétrico permite a definição desses padrões para componentes modulares e, ao mesmo tempo, possibilita a exploração de variações. Desta forma, o projeto paramétrico oferece flexibilidade dentro das restrições.

Os projetistas podem explorar várias configurações e propriedades de materiais para atingir objetivos funcionais e estéticos e, ao mesmo tempo, aderir a componentes modulares

padronizados. O design paramétrico permite explorar um espaço de projeto mais amplo, minimizando o desperdício e alcançando o desempenho ideal dentro da estrutura de componentes padronizados.

3.2.2. PROJETO

A tese procura desenvolver uma aplicação, dos algoritmos de IA às tecnologias de projetos generativos e paramétricos BIM, com o objetivo de implementar uma metodologia de apoio para o projeto paramétrico, sem tipologia definida, em construção modular.

Com o apoio do grupo DST e a bysteel, especializada em construção metálica, o desenvolvimento apresenta-se através do projeto de inovação *R2U Technologies | modular system*, com o objetivo de desenvolver a industrialização da construção modular. O grupo DST é uma empresa fundada em 1940, em Portugal e opera em países como França, Reino Unido e Angola, além de Portugal. Sua principal atividade é no setor da construção civil e obras públicas. A Bysteel, empresa do grupo DST, é referência na concepção, desenvolvimento, produção e montagem de estruturas metálicas e tem alargado sua atividade a nível internacional, de forma atuante e em exportações. O *R2U Technologies | modular system*, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), da União Europeia, é um pacto de inovação, desenvolvido a partir de um *cluster* multidisciplinar, que busca responder os novos desafios do setor da construção modular, em particular nas áreas de sustentabilidade e proteção do ambiente. O projeto está estruturado em sete *work packages*, com foco em diferentes segmentos, desde a fase de concepção de design até a de operação do edifício. São esses:

- Princípios da Construção Modular;
- Materiais;
- Produtos;
- Equipamento Industriais;
- Serviços Digitais, Colaborativos e Sistemas IoT;
- Capacitação;
- Coordenação e Disseminação;

Desenvolvendo assim, 18 produtos, processos e serviços (PPS) que incluem, novos materiais e produtos inovadores, soluções para a transformação digital, transversais a todas as fases da construção modular e um plano curricular multidisciplinar em construção modular. Entre eles, o que tangencia essa tese, denominado, “PPS 15: Sistemas, aplicações e serviços digitais para todas as fases da construção modular”.

O consórcio reúne 29 empresas e 18 Entidades não empresariais do sistema de investigação e inovação (ENESII), incluindo a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Feup). O projeto de investigação, onde este trabalho está inserido, está em desenvolvimento, nas áreas de estruturas, higrótérmica, instalações, acústica e Projeto Integrado.

3.3. METODOLOGIA

O estudo de caso apresentado nesse capítulo, tem como abordagem principal e norteadora o uso do design paramétrico, em busca da aproximação da automação para otimização do projeto de construção modular, considerando princípios de construção modular e DfMA. Com essa

abordagem, pretende-se, a partir de regras estabelecidas de conexão, gerar diferentes soluções de projeto quanto a concepção da forma, permitindo assim, o apoio à abordagem do estudo preliminar.

Entre os elementos a serem apresentados na etapa de estudo preliminar, definido pela portaria 701-H/2008, Projeto Base, que tem como objetivo de proporcionar a compreensão das soluções propostas, duas delas serão abordadas como *inputs* para a geração das diferentes soluções.

b) Definição dos critérios gerais de dimensionamento das diferentes partes constitutivas da obra;

c) Indicação dos condicionamentos principais relativos à ocupação do terreno, nomeadamente os legais, topográficos, urbanísticos, geotécnicos, ambientais, em particular, os térmicos e acústicos;

A primeira expressada como planilha quantitativa e de áreas, enquanto a segunda, a partir de levantamento do terreno e inserção da malha no modelo paramétrico.

O projeto foi organizado e desenvolvido a partir de um eixo definidor que dividiu o trabalho em duas partes. O primeiro, quanto a decisão de projeto, e o segundo, quanto a regras de parâmetros.

- Decisão de Projeto: No que tangencia a construção modular, estão relacionadas à decisão de projeto, os componentes e elementos a serem utilizados e suas informações, como por exemplo chassis, materialidade, elementos de conexão, pé direito, entre outros.
- Regras de Parâmetros: Essas são elaboradas a partir de uma gramática da forma, que define as relações constituintes da geração formal. Essas podem ser definidas a partir de uma decisão de projeto, mas são geradas automaticamente.

Essa divisão quanto a desenvolvimento, também é refletida na escolha dos softwares a serem trabalhadas, maximizando assim, seus usos.

A escolha pelo software BIM, foi baseada, primeiramente, na experiência pessoal da autora. O Archicad, software BIM (Building Information Modeling), permite criar objetos parametrizados, a partir de informações fornecidas pelo usuário, em um ambiente integrado que contribui para o desenvolvimento do projeto desde a concepção até o detalhamento final. A documentação gerada automaticamente, permite uma maior precisão e comunicação entre outros softwares BIM. Tais características, foram essenciais para validar a escolha pelo software. O BIM, ainda permite identificar e corrigir erros e conflitos de projetos antes da construção, resultando em projetos mais eficientes. No entanto, o BIM ainda é incapaz de lidar com tarefas repetitivas de forma eficiente, especialmente quando envolve a criação de geometrias complexas ou extensas.

A partir de um recurso de programação paramétrica própria do Archicad, chamada PARAM-O (Figura 17), é desenvolvido um objeto GDL (Geometric Description Language), criando regras para os parâmetros do objeto (gd.graphisoft, 2024). Objetos GDL são objetos paramétricos e contêm todas as informações necessárias para descrever elementos de construção, como modelo geométrico 3D, símbolos CAD 2D e textos. As informações em objetos GDL são organizadas em uma hierarquia de árvore com base no esquema Industry Foundation Class (IFC) (O’Keeffe et. al, 2010).

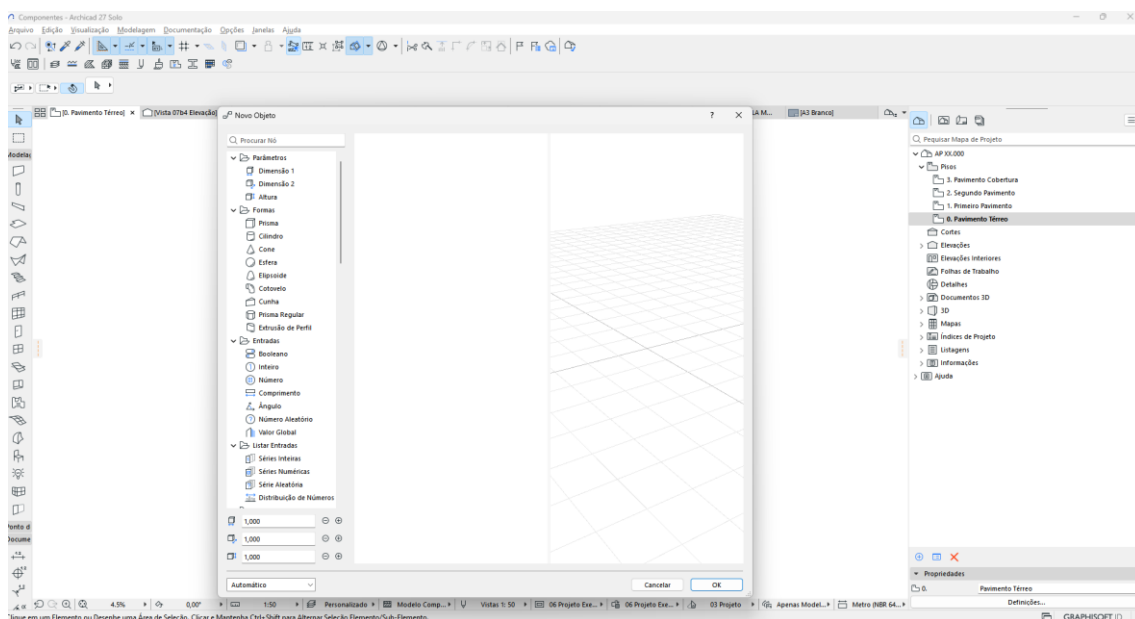


Figura 17 - Criação de objeto GDL no PARAM-O Fonte: Autora

Nesse sentido, no projeto desenvolvido, o Archicad, compreende os pontos de decisão de projeto. Como ponto inicial do desenvolvimento, foi realizada a definição e modelagem, em objeto GDL, dos componentes e elementos parametrizados e o conjunto de informação presente em cada componente. Como ponto final do desenvolvimento dessa tese, o Archicad recebe o modelo paramétrico para a continuação do desenvolvimento do projeto a nível de construção e documentação.

O Rhinoceros, é um programa de modelagem 3D *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS), desenvolvido pela empresa norte-americana Robert McNeel & Associados, amplamente utilizado em diversas áreas. Seu uso está nas mais diversas áreas, como arquitetura, design de produto, engenharia e joalheria. Sua interface com ferramentas intuitivas e alta precisão permite criar modelos 3D complexos, com análises e documentação. O Grasshopper, (Figura 18) é um plugin nativo do Rhinoceros, desenvolvido pela empresa dinamarquesa Grasshopper 3D, para criar modelos paramétricos, a partir de definições de regras e *inputs*, para controle da forma e a geometria do modelo, permitindo gerações infinitas de variações a partir de um único modelo base, de forma generativa. Além de explorar diferentes soluções de forma rápida, permite automatizar tarefas repetitivas e complexas, otimizando o tempo de trabalho.

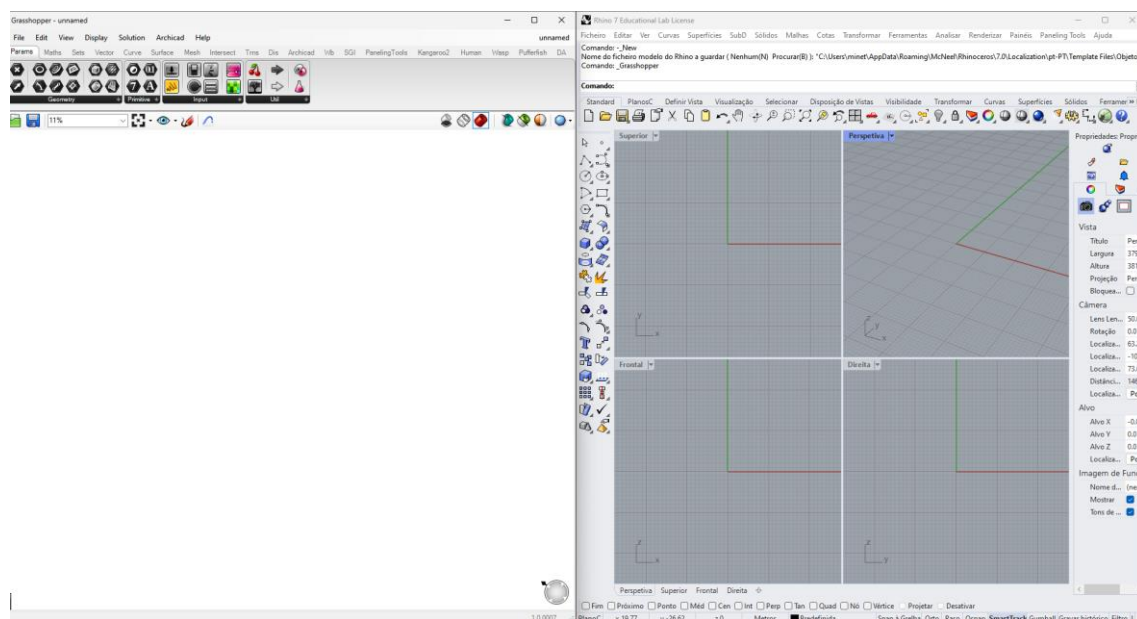


Figura 18 - Interface entre Grasshopper e Rhinoceros Fonte: Autora

O design generativo, conforme discutido na seção anterior, é um método que permite a geração de formas, por meio de algoritmos, que automatizam tarefas repetitivas e demoradas. Ao utilizar um conjunto de regras que podem ser aplicadas em diversas combinações, criamos um sistema generativo. Este sistema permite a geração de diversas soluções para o mesmo problema, com parâmetros flexíveis. Dessa forma, o design generativo, utilizado aqui por meio do Grasshopper, permite criar um sistema que projeta o edifício, em vez de projetarmos a edificação em si.

No trabalho desenvolvido, o Rhino-Grasshopper, compreendeu a criação de uma gramática da forma, que estruturou a geração de composições formais. (Wortmann, 2018), definem que a Gramática da forma (SG), como um conjunto de regras e transformação aplicadas a formas em um processo de design. Incluindo um conjunto de formas, rótulos, regras e um design inicial, juntamente com um conjunto de transformações admissíveis para aplicar as regras. Esse sistema formal é usado para gerar uma variedade de designs, aplicando as regras para transformar as formas em uma maneira passo a passo. O conceito é amplamente usado no design computacional para dar suporte à exploração criativa e à geração sistemática de designs. A SG, é então um sistema de design generativo que pode analisar e produzir formas complexas (Nguyen, at 2019).(BuHamdan, at, 2021), relaciona ainda que, assim como na gramática, onde um conjunto de regras regem a estrutura das sentenças em um idioma, inclusive como as palavras são organizadas para criar frases e sentenças significativas, a Gramática da Forma, estrutura as composições formais geradas, a partir de formas básicas e regras associativas.

(Nguyen, at 2019), expõem que a gramática da forma é composta a partir da definição dos seguintes elementos, e exemplificada na Figura 19:

- Vocabulário da Forma (VT): Constituído de um conjunto finito de formas terminais;
- Relações entre as formas (VM): Operações espaciais estabelecidas entre as formas primitivas;
- Regras formais (R) : Conjunto finito de regras da forma;
- Formas Iniciais (I): Conjunto de formas pertencentes ao vocabulário das formas;

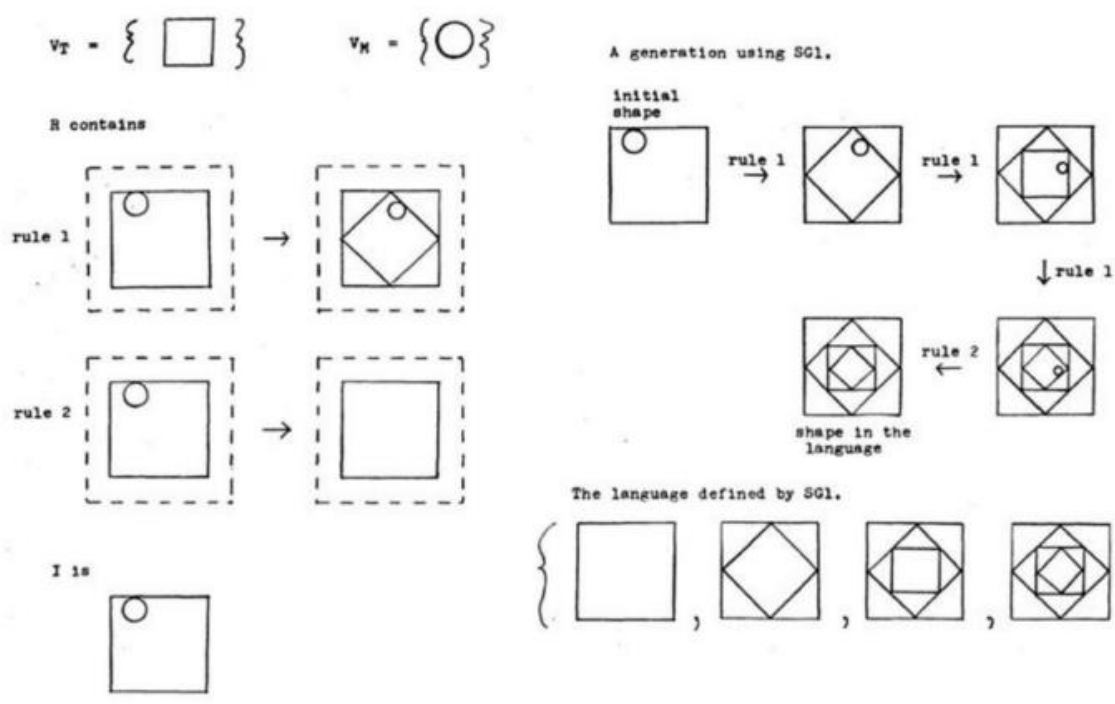


Figura 19 - Exemplo de aplicação da gramática da forma para quadrados inscritos. Fonte: (Nguyen, at 2019)

Através de processos generativos, que geram várias soluções em potencial para serem avaliadas e escolhidas pelo arquiteto, princípios geométricos-matemáticos podem ser aplicados para alcançar um conjunto de arranjos compositivos entre os módulos.

De forma prática na aplicação do projeto, para a construção de uma gramática da forma, são necessários fundamentalmente: Os elementos, que receberam as regras; as regras aplicadas a partir de uma transformação; e um operador de marcador (booleano). As transformações, segundo (Wortmann, 2018), devem ser do tipo euclidianas, como tradução, rotação, reflexão, escala e identidade.

Dessa forma, o presente estudo é concebido a partir de uma metodologia de intersecção dos programas, paramétrico e BIM, considerando princípios da construção modular e da metodologia DfMA, visando assim, testar, verificar e qualificar o projeto desenvolvido.

3.4. PLANO EXPERIMENTAL

Para o cumprimento dos objetivos estabelecidos dessa tese, a criação e execução do projeto foi dividida em três fases distintas.:

Fase A: Gerar soluções, através de algoritmos generativos, nos softwares Rhino-Grasshopper.

Fase B: Verificar/Avaliar, soluções apresentadas, de modo a selecionar as opções aptas.

Fase C: Evoluir (Otimizar), executado a partir de um algoritmo genético, a partir de otimizações desejadas.

Essas três fases podem ser descritas como ciclo em *loop*, conforme a Figura 20

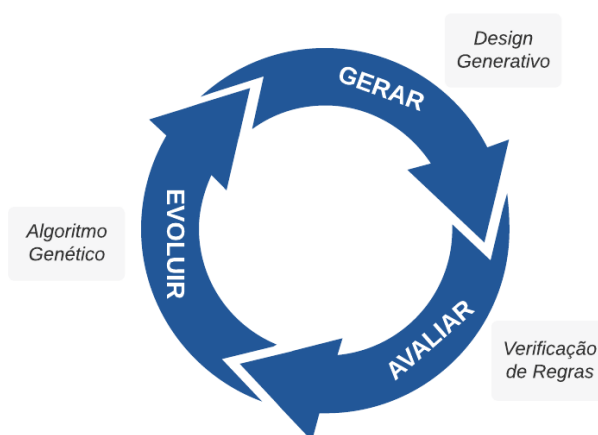


Figura 20 - Processo de Desenvolvimento do Modelo Paramétrico Fonte: A autora

Entendendo o edifício como produto, define-se a otimização, através de uma verificação/avaliação, seguindo os princípios do DfMA, apresentado no capítulo anterior, onde serão avaliadas as diretrizes abaixo, para evolução do design:

- Minimizar o número total de peças (Abazid, 2019);
- Minimizar a variação de peças (Nordestgaard, 2019) ;
- Usar componentes padrão (Nordestgaard, 2019) ;
- Conexão mecânicas (Abazid, 2019);

Conforme detalhado no Capítulo 1, o problema e a importância desta pesquisa, surgem da união de duas áreas em crescimento e que, embora a indústria AEC possua diversas tecnologias aplicadas a fase de projeto, são ainda dissociadas e não preditiva.

Dessa forma, foram aplicadas tecnologias disponíveis como design generativo, verificação automatizada de projeto paramétricos e o BIM, em um ambiente único, como solução para o problema proposto. A interface entre as ferramentas/softwarewares foi considerando como uma abordagem para sequência da elaboração de projeto, sendo fundamental uma integração rápida e precisa.

3.5. PARÂMETROS DE PROJETO

A palavra Parâmetro, é definida como “*algo que decide ou limita a maneira como algo pode ser feito*” (PARAMETER, 2024). Na seção 3.2.1, foi apresentado que dentro do design paramétrico, a palavra parâmetro, se configura como unidade de controle, permitindo a manipulação sistemática de um modelo ou sistema. No projeto de construção modular, a palavra parâmetro, pode ser estendida como unidades básicas de construção. (Dorries, at, 2019) estabelecem dez parâmetros que influenciam o projeto de um edifício pré-fabricado, de modo a criar um diálogo entre todas as partes envolvidas na concepção do projeto, conforme Figura 21.

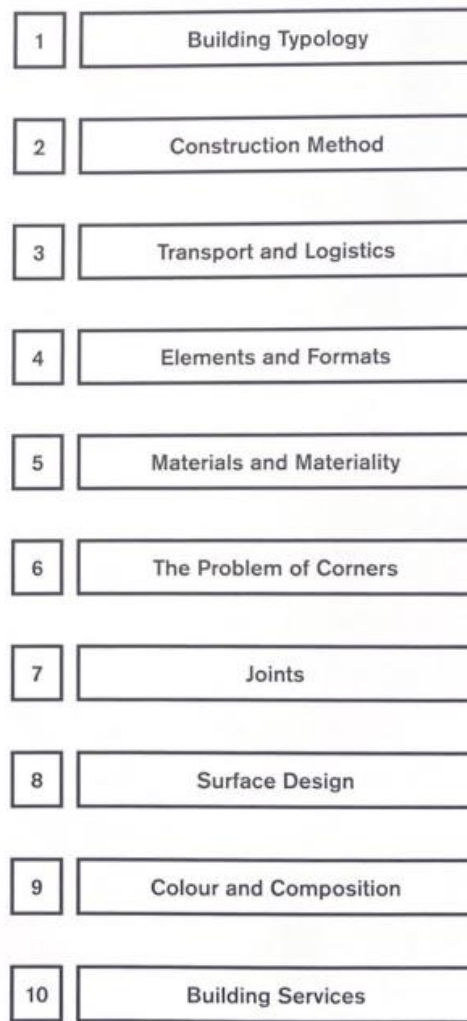


Figura 21 - Parâmetros de projeto pré-fabricado Fonte: Dorries and Zahradnik, 2019

De modo a enquadrar o trabalho desenvolvido, através de inputs necessários para o desenvolvimento do modelo paramétrico, foram detalhados os parâmetros mais relevantes, considerando o projeto descrito anteriormente.

3.5.1. MÉTODO CONSTRUTIVO

(Dorries et, al 2019), apresentam quatro métodos de construção quanto a modularidade, conforme Figura 22, são eles:

- Construção em bloco de painéis: Grandes Painéis
- Construção em Painéis: Elementos autoportantes ou entre pavimentos
- Construção em componentes (esqueleto): estrutura e vedações independentes
- Construção em módulos: A partir de módulos tridimensionais.

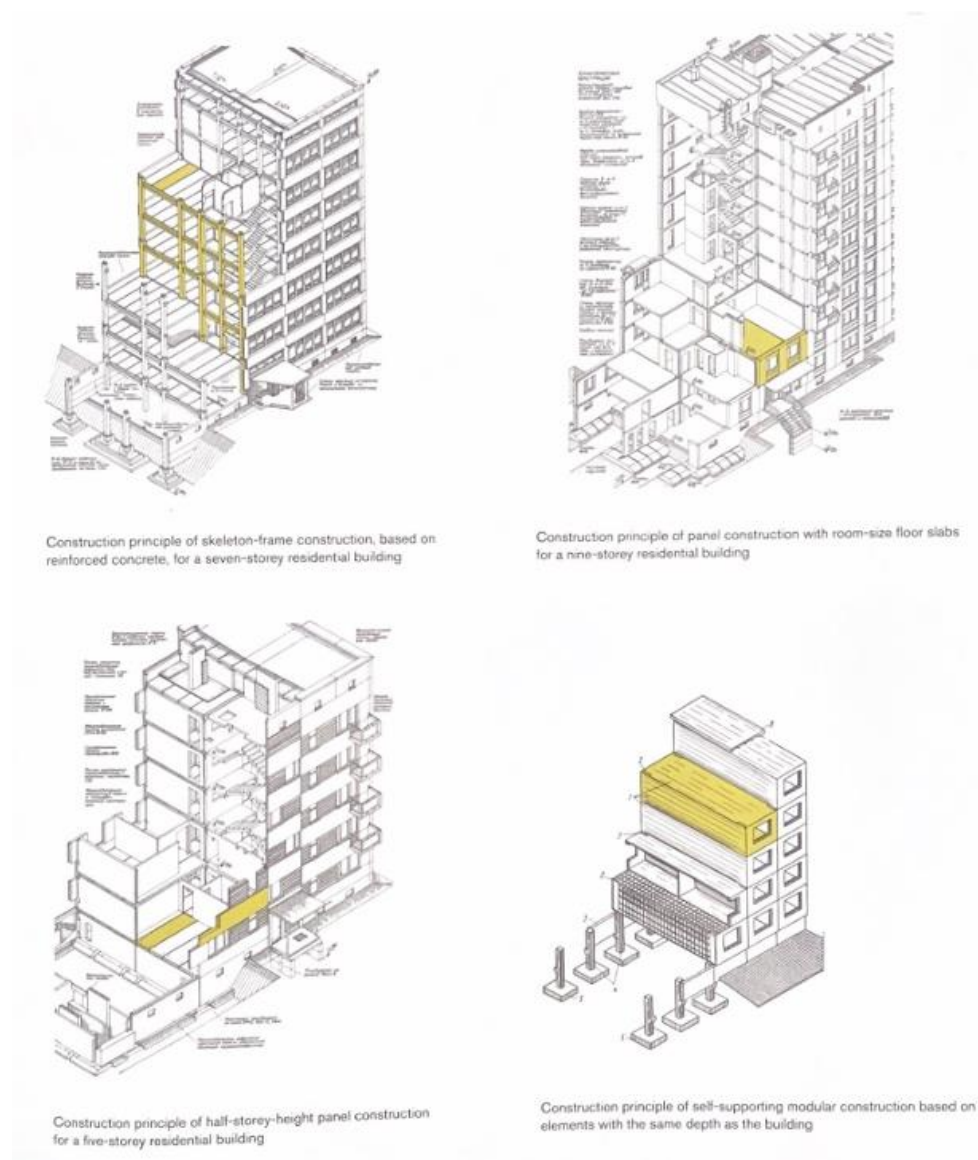


Figura 22 - Quatro métodos apresentados quando a construção modular. Fonte: (Dorries et. al, 2019)

A partir da revisão realizada sobre o assunto, apresentada na seção 2.2.1 e dos princípios indicados no projeto de investigação R2U e como tomada de decisão da empresa, BySteel, o projeto é desenvolvido sobre a perspectiva de uma construção modular 3D. Dessa forma, os módulos são construídos em um ambiente controlado, com processos padronizados e uso eficiente de materiais (Banihashemi et al., 2018).

O tempo de conclusão, foi outro fator determinante quando a execução do projeto, pela empresa. A construção acontece simultaneamente no local (preparação da fundação) e fora do local (construção dos módulos). Reduzindo significativamente o cronograma do projeto.

Apesar do uso de aço como esqueleto estrutural em um edifício não seja novidade, o uso de aço no setor residencial ainda é pequeno, um exemplo é o Edifício Residencial Carmle Place, em Nova York, mostrado na Figura 23. As construções em aço, tem uma elevada capacidade de carga, sendo adequadas para o uso em regiões com sismos (Dorries et. al, 2019). De encontro ao apresentado na seção 3.3.2, a BySteel, é a empresa, do grupo DST,

especializada em estruturas metálicas. E por isso, se tornou fator determinante na escolha por uma estrutura modular metálica.



Figura 23 - Microapartamentos executados em aço, edifício residencial Carmel em NY. Fonte: Escritório NYC Mavor, retirado do livro(Dorries et. al, 2019)

3.5.2. TRANSPORTE E LOGÍSTICA

A capacidade de transporte e montagem, assim como as faixas de operações e regulamentações de trânsitos, são alguns aspectos determinantes para o dimensionamento dos módulos. (Almashaqbeh, 2021), o transporte e a logística devem ser otimizados considerando:

- Dimensões do caminhão e capacidade de peso: O tamanho e o peso dos módulos pré-fabricados devem ser otimizados nas dimensões e na capacidade de peso dos caminhões disponíveis, garantindo um transporte seguro e eficiente;
- Taxas de custo de transporte: As diferentes dimensões e capacidades de peso dos caminhões influenciam as taxas de custo de transporte, que, por sua vez, afetam a relação custo-benefício do transporte de diferentes tamanhos de módulos.
- Restrições práticas: O planejamento do transporte deve obedecer a restrições como, por exemplo, garantir que os módulos caibam nas áreas de embarque dos caminhões e não se sobreponham, o que afeta diretamente as decisões de dimensionamento dos módulos.
- Redução do arrasto aerodinâmico: A disposição dos módulos nos caminhões, incluindo seu tamanho e orientação, pode minimizar o arrasto aerodinâmico, melhorando a eficiência do combustível durante o transporte. Essa consideração pode influenciar o projeto e o dimensionamento dos módulos.

Ainda que a capacidade dos estaleiros atuais, possam superar os 20m de comprimento e alturas igualmente grandes, o custo de transporte e montagem, seriam desproporcionalmente altos (Dorries et. al, 2019).

Segundo o Regulamento de Autorizações Especiais de Trânsito (RAET), aprovado pela portaria n.º 472/2007, de 15 de Junho, publicada no Diário da República, 2.ª série, n.º 119, de 22 de Junho de 2007, o dimensionamento máximo de transporte em rodovias, sem a necessidade de autorização especial, é de 12m de comprimento, 2,55m de largura e 4,3m de altura. Para

transportes entre 12m e 16,5m, é necessária uma única autorização, enquanto entre 16,5m e 25,25, é necessária autorização de transporte excepcional.

3.5.3. ELEMENTOS E FORMATOS - MÓDULOS, COMPONENTES E ELEMENTOS DO SISTEMA

No que se refere as partes constituintes de um edifício modular, pré-fabricado, e industrializado, a variações e número de peças, influenciam os custos e tempo de uma construção. (Dorries et. al, 2019), salienta que quanto menor o número de elementos distintos em uma série, mais barata e rápida será sua produção.

Ainda que seguindo os princípios do DfMA, apresentado na seção 2.2.2, e de modo a ter o menor número de variações de peças dentro da constituindo do edifício, porém viabilizando um nível mínimo personalização, apresentou um enorme número de componentes, conforme Figura 24.



Figura 24 - Catálogo das variações dos elementos de um edifício. Fonte: (Dorries et. al, 2019).

3.5.4. O PROBLEMA DOS CANTOS

A partir da perspectiva da construção modular os cantos têm sido um problema amplamente discutido. (Dorries and Zahradnik 2019), destaca que os painéis de cantos são, geralmente, elementos especiais que se diferenciam dos elementos de composição das fachadas.

Na Figura 25, são apresentadas possíveis soluções para os cantos das envoltivas. Tal problema é simplificado, quando o projeto é desenvolvido em módulos 3D, isso porque dentro da fábrica, conseguimos uma maior precisão e qualidade no produto desenvolvido.

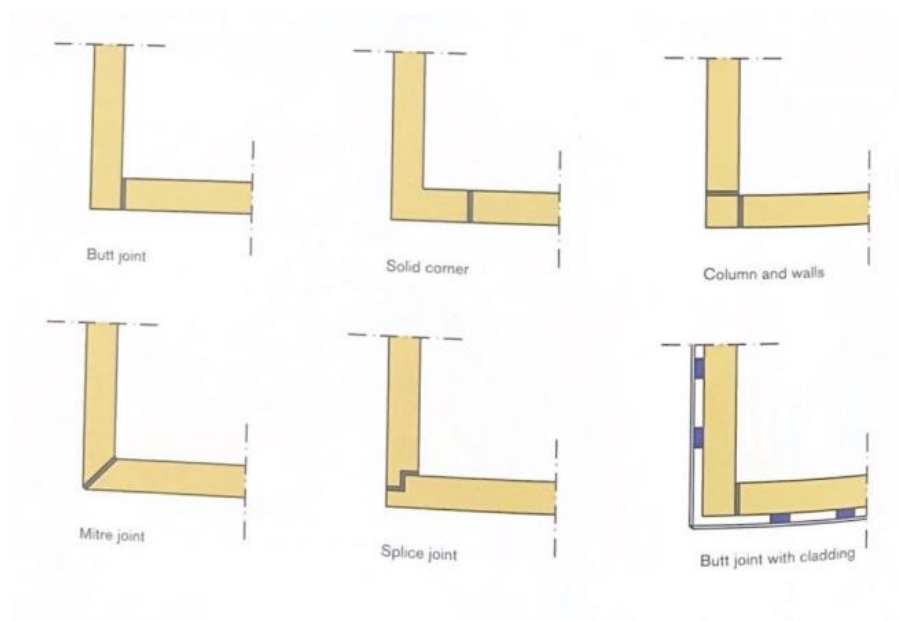


Figura 25 - Exemplos de soluções para os cantos. Fonte: (Dorries and Zahradnik 2019)

3.5.5. JUNTAS

As juntas podem ser percebidas visualmente nas fachadas dos edifícios, e em um edifício pré-fabricado estão entre os detalhes mais proeminentes (Dorries et al, 2019). No uso de elementos 3D, são reflexos das conexões entre os módulos, conforme ilustrado na Figura 26



Figura 26 - Exemplo de Juntas aparente na Fachada Fonte: (Dorries et al, 2019).

Conexões entre módulos são especialmente importantes, pelo seu impacto na integridade estrutural, eficiência de montagem e desempenho geral da construção (Picard et al., 2024). (Rajanayagam et al., 2021) sugere que melhorar as conexões entre módulos é crucial para o avanço das técnicas de construção modular, abordando os desafios no projeto estrutural e aumentando a eficiência e a segurança geral dos edifícios modulares.

Os módulos devem então prever os conectores entre componentes, e os conectores entre módulo, tanto horizontalmente como verticalmente. As características das junções verticais e horizontais se configuram como consequências das relações espaciais estabelecidas entre os blocos modulares. Essas relações, por sua vez, definem os componentes estruturais que serão necessários para conectar os módulos de forma segura e eficiente.

As relações espaciais entre os módulos modulares desempenham um papel fundamental na definição das características das junções, da estrutura e da capacidade combinatória do sistema modular. Essa interconexão garante a flexibilidade, a adaptabilidade e a versatilidade da construção modular, permitindo a criação de projetos únicos e eficientes.

Os conectores de um mesmo módulo, ou seja, que conectam seus componentes, devem ser executados ainda em fábrica, de modo a garantir o método construtivo escolhido (3D), e se configuram por unir um pilar e duas vigas. Já os conectores entre módulos, devem ser previstos na montagem do edifício, com peças agregadas no sítio. De modo a reforçar os princípios do DfMA, os conectores devem ser do tipo mecânico, evitando fixações químicas.

Para o desenvolvimento dessa tese, não será feito um estudo aprofundado das juntas, devido a sua complexidade e especificidade. Porém é importante, ser considerada como montagem e por isso, será feita uma hipótese simples dos elementos conectores e suas diferenças por localização.

3.5.6 MÓDULO DE SERVIÇO

O módulo de serviço, é um importante parâmetro, que afeta tanto a estética do edifício, como o custo, de modo que o projeto deve incorporar tais módulos desde a concepção formal. É possível planejar as instalações, de modo que os ambientes úmidos, estejam alinhados verticalmente (Ver Figura 27), e que os aquecedores estejam dispostos de modo a utilizar linhas curtas (Dorries et. al, 2019), permitindo uma otimização não só dos espaços, como nos custos de implementação e instalações.

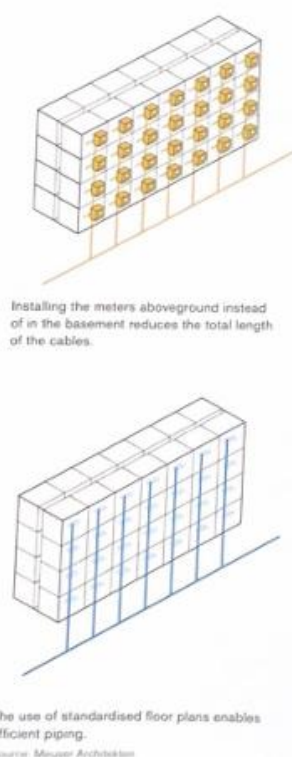


Figura 27 - Instalações alinhadas verticalmente Fonte: (Dorries et. al, 2019)

Tais otimizações foram consideradas quanto a desenvolvimento de projeto, sendo agrupado em um mesmo módulo, denominado “Módulo Úmido”, cozinha e banheiro. Esses elementos também são verticalmente alinhados aos demais.

3.6. MODELO PARAMÉTRICO

Um modelo paramétrico é uma ferramenta usada em diversos campos, desde a engenharia e arquitetura até o design industrial (Reisinger et al., 2020). Como desenvolvido na seção 3.2.1, ele se baseia na ideia de que um objeto ou sistema pode ser definido por um conjunto de parâmetros inter-relacionados, que determinam suas características e comportamento (Cook, 2024).

O desenvolvimento do trabalho, é realizado, com a interação dos softwares Archicad e Grasshopper-Rhino, de modo a permitir criação do modelo paramétrico, expandindo as possibilidade de design e otimização, e gerindo as variações de forma interoperável, facilitando o fluxo de trabalho entre as etapas.

3.6.1. ARCHICAD

Cada módulo de ambiente, denominado anteriormente como úmido, geral, circulação e escada, é composto obrigatoriamente de estrutura painéis e lajes. E para uma correta documentação é necessário que esses componentes sejam separadamente visualizados, através de uma combinação de layers nativo do Archicad. De modo a aproveitar o potencial de cada ferramenta do programa, foram utilizados, dois principais recursos: Ferramenta Viga e pilar, e objeto GDL, ambos nativos do Archicad.

Para o sistema estrutural básico (viga-pilar), foi utilizado o recurso de perfil da ferramenta viga (Figura 28) e pilar, de modo que futuramente, qualquer ajuste pudesse ser realizado sem grandes complexidades. Também já foi definido o *layer* correspondente.

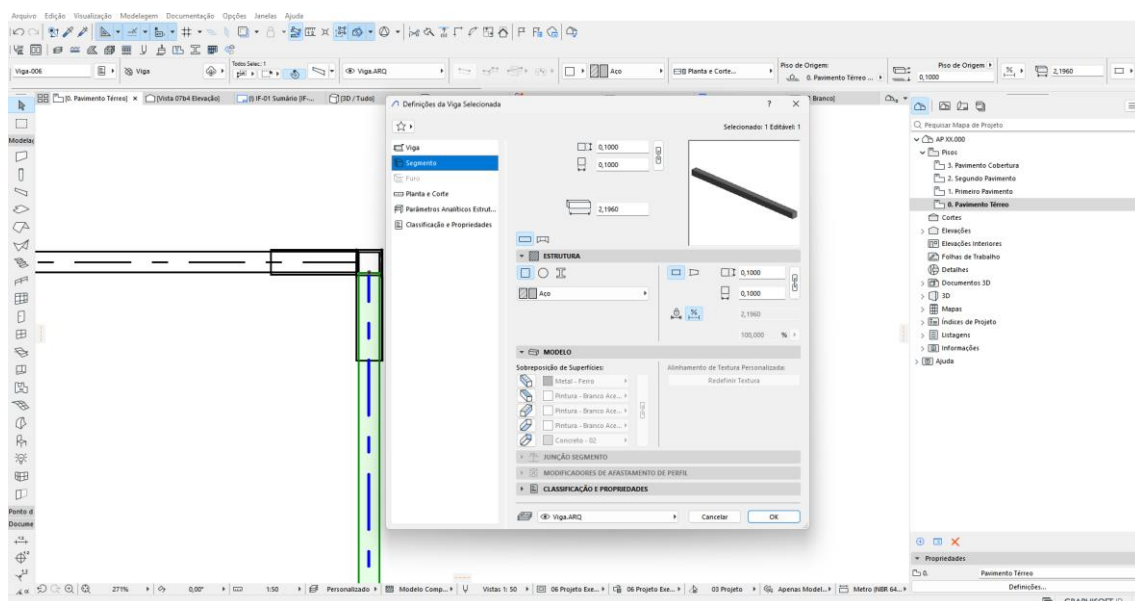


Figura 28 - Definição do Perfil Viga no Archicad Fonte: Autora

Para os demais elementos, foi desenvolvido um objeto GDL (Figura 29), associado a um ID e com escolhas quanto a projeto. Na Figura 30, é demonstrado a criação de um painel de fachada, com possibilidade de escolha pelo projetista de inserção automática de janela e/ou contraventamento.

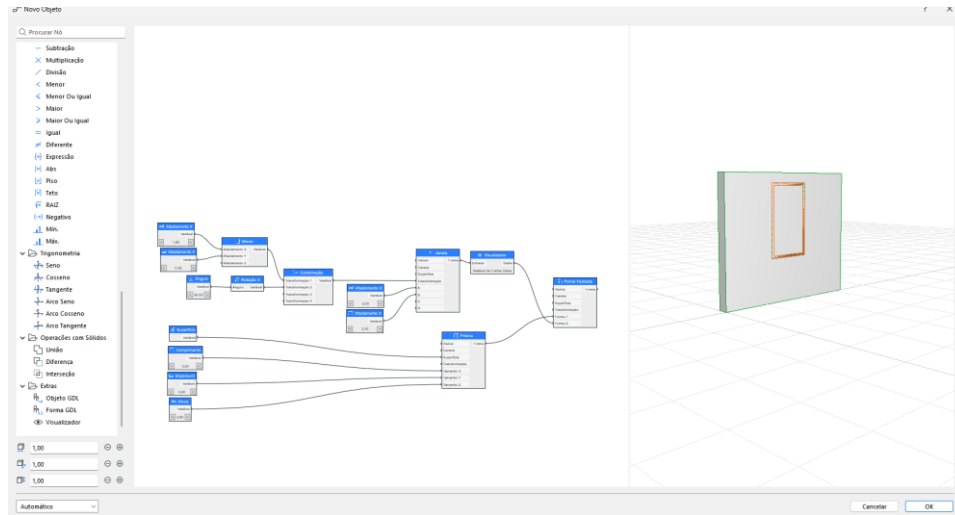


Figura 29 - Criação de Objeto no PARAM-O Fonte: Autora

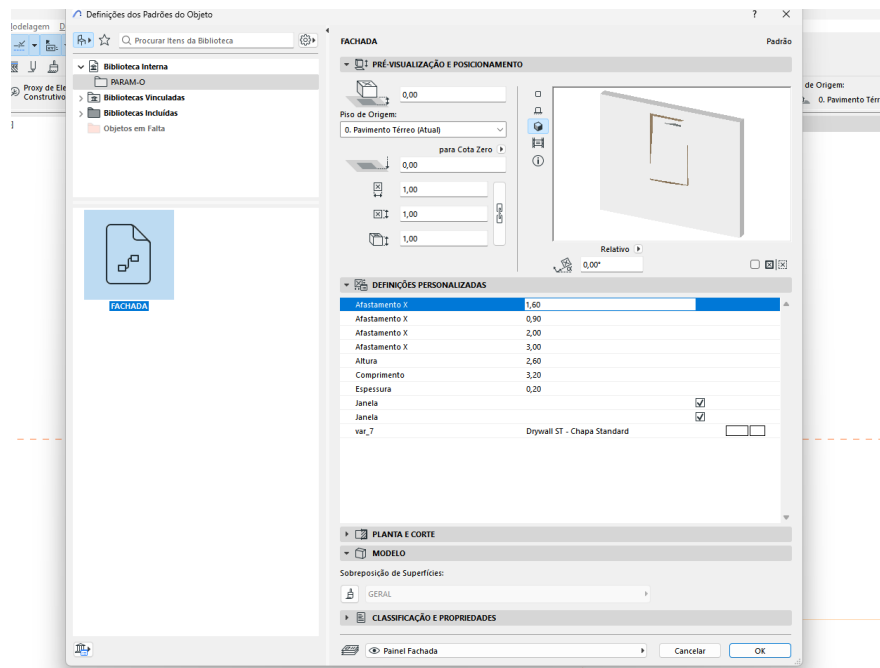


Figura 30 - Parametrização do Objeto GDL Fonte: Autora

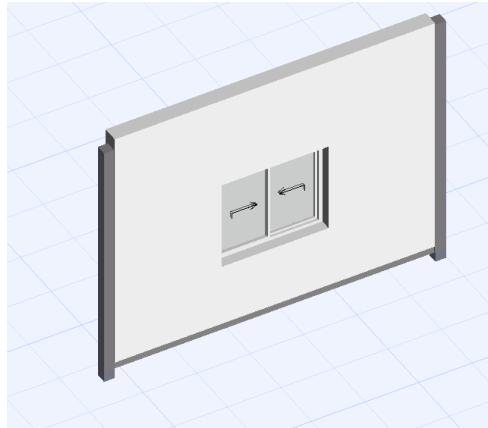


Figura 31 - Resultado do objeto paramétrico, baseado nas escolhas. Fonte: Autora

Os componentes foram mapeados seguindo sua três critérios: Elementos, localização e função. Na Tabela 5, é demonstrado uma tabela de mapeamento de Fachadas.

ID	LOCALIZAÇÃO	PROJETO				LOCALIZAÇÃO	
		CEGO	C/ ABERTURA	C/ CONTRAVENTAMENTO	S/ CONTRAVENTAMENTO	ENTRE MÓDULOS	CANTO DIREITO
FAC-01	COBERTURA	x		x		x	
FAC-02		x		x			x
FAC-03		x		x			
FAC-04		x			x	x	
FAC-05		x			x		x
FAC-06		x			x		x
FAC-07			x	x		x	
FAC-08			x	x			x
FAC-09			x	x			x
FAC-10			x		x	x	
FAC-11			x		x		x
FAC-12			x		x		x
FAC-13	ENTRE MÓDULOS	x		x		x	
FAC-14		x		x			x
FAC-15		x		x			x
FAC-16		x			x	x	
FAC-17		x			x		x
FAC-18		x			x		x
FAC-19			x	x		x	
FAC-20			x	x			x
FAC-21			x	x			x
FAC-22			x		x	x	
FAC-23			x		x		x
FAC-24			x		x		x
FAC-25	RÉS DO CHÃO	x		x		x	
FAC-26		x		x			x
FAC-27		x		x			x
FAC-28		x			x	x	
FAC-29		x			x		x
FAC-30		x			x		x
FAC-31			x	x		x	
FAC-32			x	x			x
FAC-33			x	x			x
FAC-34			x		x	x	
FAC-35			x		x		x
FAC-36			x		x		x
FAC-37	VÃO	x		x		x	
FAC-38		x		x			x
FAC-39		x		x			x
FAC-40		x			x	x	
FAC-41		x			x		x
FAC-42		x			x		x
FAC-43			x	x		x	
FAC-44			x	x			x
FAC-45			x	x			x
FAC-46			x		x	x	
FAC-47			x		x		x
FAC-48			x		x		x

Tabela 5 - Mapeamento de variações do componente Fachada. Fonte: Autora

Os componentes estão divididos quanto a função entre fachadas, painéis internos, lajes e estrutura. Quanto a localização, em relação ao edifício, como topo, rés do chão, esquinas de fachadas ou entre módulos. Apresentam ainda diferenciação quanto aos elementos baseados na decisão de projeto, portas, janelas, contraventamentos, módulos cozinha e banheiro.

Como resultado, foi criada uma biblioteca dos componentes paramétricos, necessários para o projeto, todos os elementos estão demonstrados na Tabela 6.

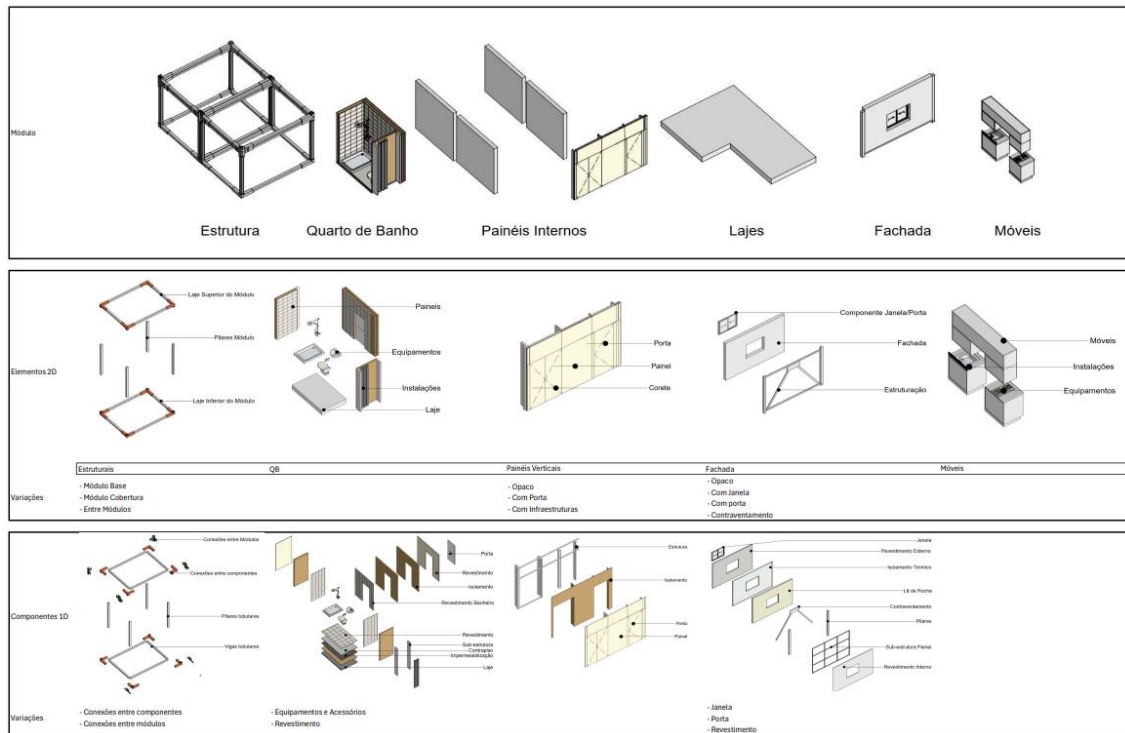


Tabela 6 - Esquema demonstrando os Componentes, Elementos e Módulos do Sistema. Fonte: Autora

3.6.2. GRASSHOPPER

Para definir um algoritmo de projeto, é fundamental alimentar diversos componentes com dados, estabelecendo a ordem de conexão de acordo com a operação a ser realizada.

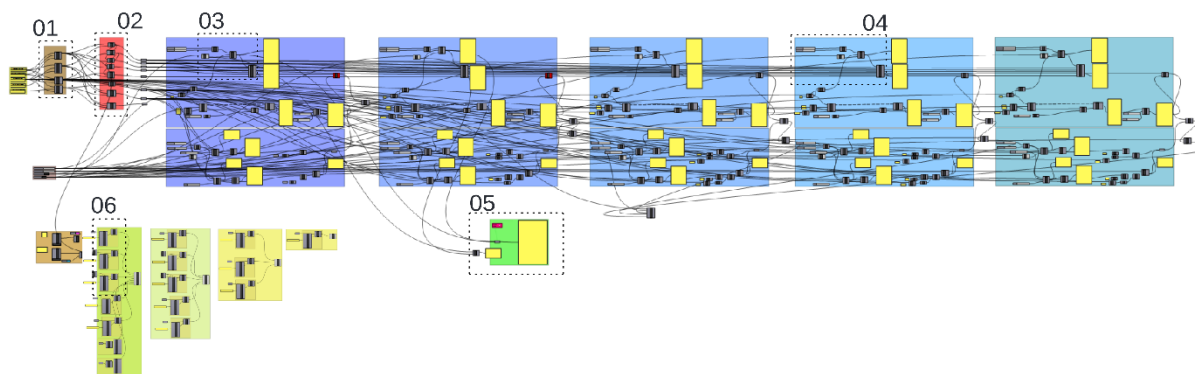
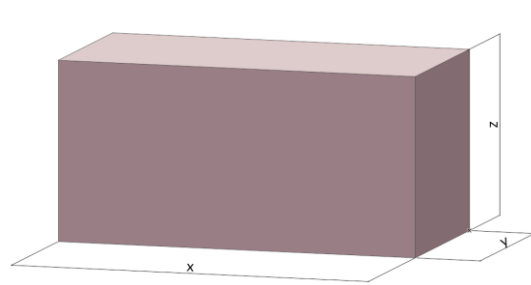


Figura 32 - Algoritmo Generativo completo. Fonte: Autora

O algoritmo foi desenvolvido em três partes, Gramática da forma (Representado em tons de azul), Connection Archicad (Representado em Amarelo) e Algoritmo genético (Representado em Verde), conforme demonstrado na Figura 32. O desenvolvimento do projeto, como demonstrado, é bastante complexo. Assim, as partes relevantes para a construção do modelo, estão numeradas na Figura 32, de 01 a 06 e serão destacadas abaixo.

A partir da definição dos componentes, foram elaborados quatro tipos de módulos, que se diferenciam quanto a função, dimensão e/ou obrigatoriedade no projeto, demonstrados na Figura 33.



MÓDULO	AMBIENTE/FUNÇÃO	DIM. X	DIM. Y	DIM. Z
E	Circulação Vertical	3,2	4,8	2,6
C	Circulação Horizontal	3,2	1,1	2,6
G	Geral (Quarto/Sala)	3,2	2,4	2,6
U	Úmido (Cozinha + Banheiro)	3,2	2,4	2,6

Figura 33 - Função e dimensionamento dos módulos. Fonte: Autora

Na Figura 34, é apresentado o vocabulário inicial para a Gramática da Forma, que combinados a partir de regras determinadas, serão os inputs para o algoritmo generativo da “Fase A: Gerar”. Como forma de facilitar a visualização, posteriormente apresentada, as cores aqui representantes de cada módulo, serão mantidas.

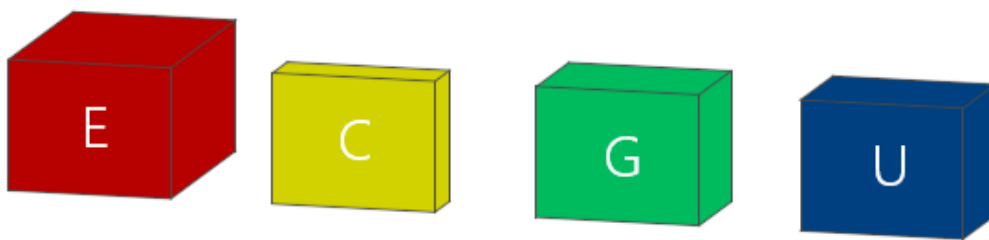


Figura 34 - Representação modular das formas iniciais da Gramática da Forma. Fonte: Autora

A estruturação do vocabulário inicial, foi implementada no ambiente computacional Rhinoceros-Grasshopper Figura 35. Os módulos foram modelados diretamente no Grasshopper, conforme Figura 36, através de componente próprio, usando pontos de referência das extremidades da caixa, otimizando o algoritmo, para que ele possa rodar sem arquivo secundário do Rhinoceros.

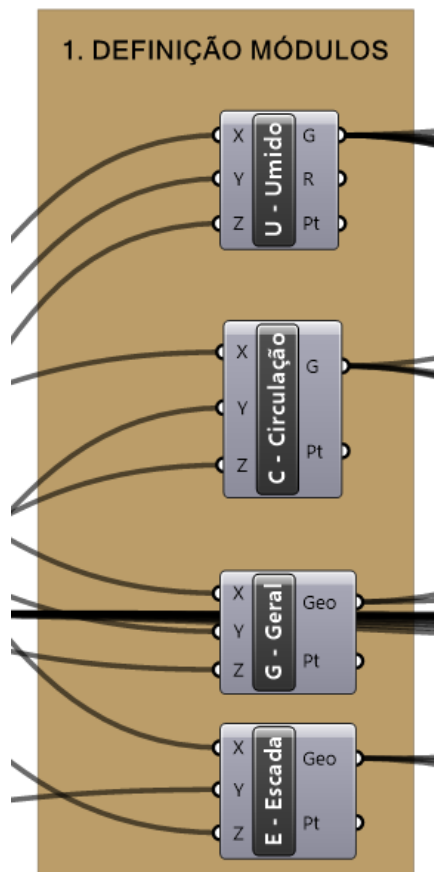


Figura 35 – Destaque 01 - Cluster de modelagem Geométrica

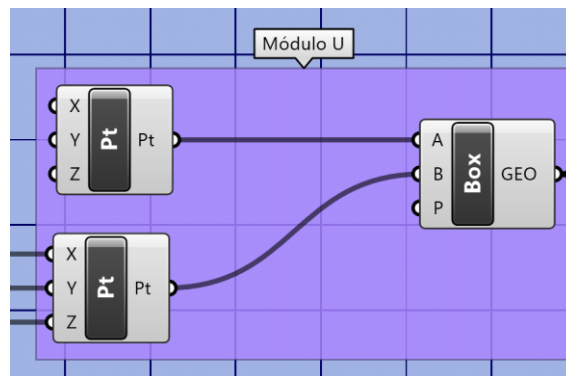
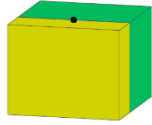
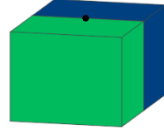
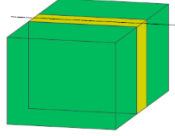
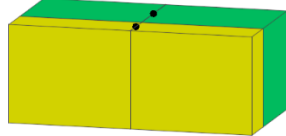
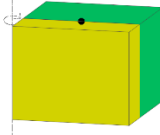
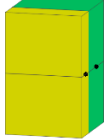
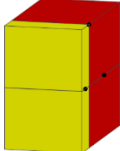


Figura 36 - Interior do Cluster Módulo Úmido. Fonte: Autora

O processo apresentado na Figura 36, foi repetido para todos os módulos, conforme apresentado na Figura 35.

Cada módulo é combinado, seguindo regras estabelecidas, apresentada na Tabela 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a partir da de um marcador, que opera tais regras. Sendo assim, foram criadas 8 regras iniciais da Gramática da Forma.

Regras	Natureza	Ação	Demonstração
R1	Obrigatório	U atrai e conecta o C	
R2	Aleatório	U atrai e conecta o G	
R3	Aleatório	Espelho U no eixo de C	
R4	Aleatório	C atraia e conecta lateralmente C U atraia e conecta lateralmente U	
R5	Aleatório	Giro de 90° no eixo	
R6	Aleatório	C+U atrai e conecta no eixo z	
R7	Condicionante	Se R6, então C atrai e conecta a E e C+E atrai e conecta C+E no eixo Z	
R8	Condicionante	Se R7, então:	

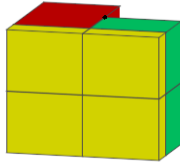
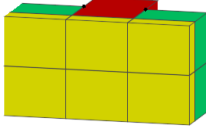
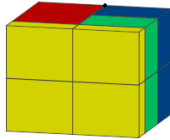
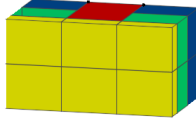
R8.1		E atraí e conecta a U, ou;	
R8.2		E atraí e conecta a U nos dois pontos, ou;	
R8.3		E atraí e conecta a U + G, ou;	
R8.4		E atraí e conecta a U + G nos dois pontos.	

Tabela 7 - Regras da Gramática da Forma Fonte: Autora

Após, foram desenvolvidas as regras da Gramática da Forma (Figura 37), a partir das definições da Tabela 7. Estruturado a partir de um sistema de interação, onde a primeira regra é fundamental, com a criação de um ambiente integrado Úmido e Circulação, e as demais interações.

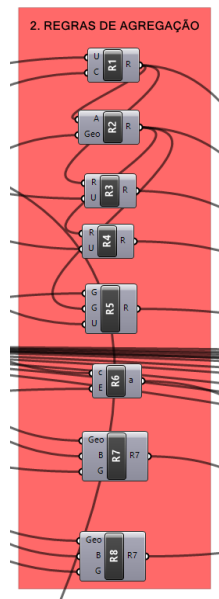


Figura 37 – Destaque 02 - Regras da Gramática da Forma Fonte: Autora

Outro ponto condicionante, refere-se as colisões. As colisões determinaram o tipo de conexão dos módulos e o tipo de painel, e estão demonstrados na Figura 38.

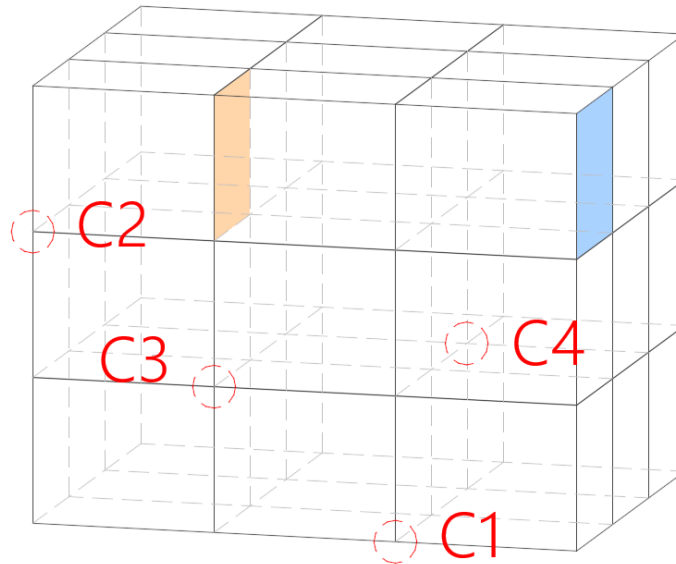


Figura 38 - Condicionante por colisão Fonte: Autora

Para identificação das colisões e ação necessária a partir delas, foi utilizado o comando de SmartAttribute, do Plugin Wasp Figura 39.

O Wasp, um plugin desenvolvido em Python para o Grasshopper (Food4rhino, 2024), oferece um conjunto robusto de ferramentas combinatórias para o design com elementos discretos. Cada elemento é detalhadamente descrito, incluindo geometria, posição e orientação das conexões, permitindo a criação de estruturas complexas através de processos de agregação. A topologia de cada elemento, definida pelas conexões, guia a criação de estruturas complexas, enquanto diversas opções de agregação permitem gerar formas variadas. O plugin também inclui ferramentas para restringir e visualizar as estruturas geradas.

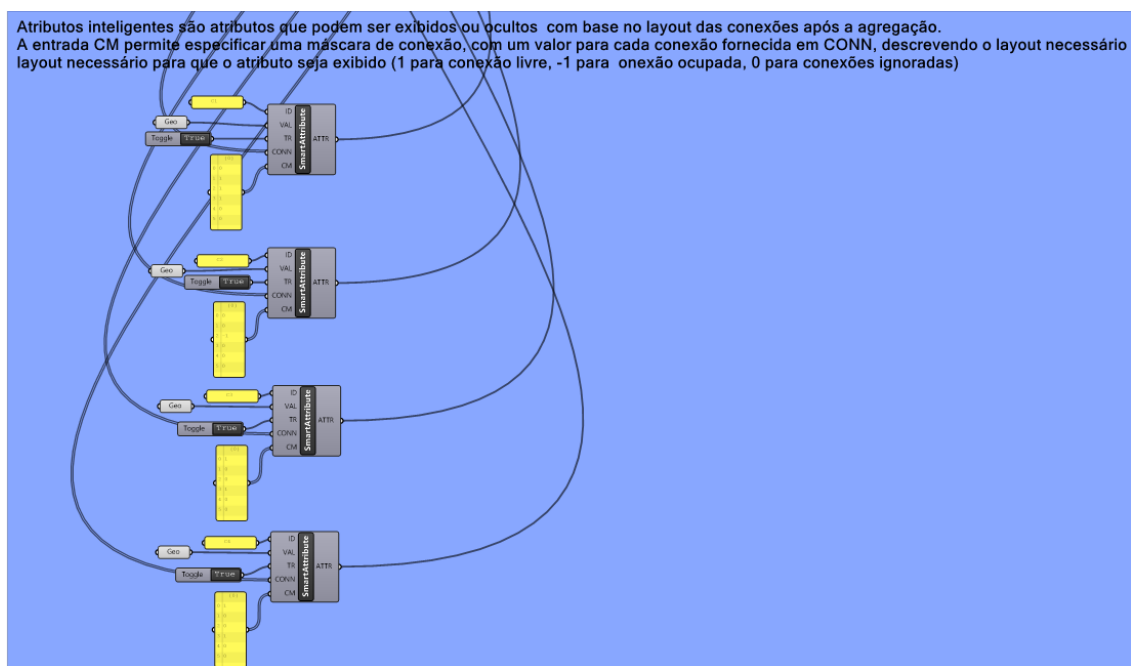


Figura 39 – Destaque 03 - Detalhe da utilização do SmartAttribute Fonte: Autora

No que se refere aos painéis, caso haja colisão de módulos, o painel é classificado como interno (laranja), caso não haja colisão, classificado como Fachada (azul).

Já as conexões, só são apresentadas quando ocorre uma colisão entre dois ou mais módulos. Nesse caso ela pode ser de 4 tipos, conforme

Conexão	Colisão	Conector
C1	2 módulos verticais	
C2	2 módulos horizontais	

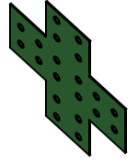
C3	4 módulos	
C4	8 módulos	

Tabela 8 - Conectores de módulos Fonte: Autora

Conforme mencionado anteriormente, o tema de conexões é um assunto complexo e para tal, no desenvolvimento desse trabalho, será considerada apenas como elemento. Não sendo realizado qualquer estudo sobre sua eficiência.

Para gerar as opções, foi usado o recurso GHPython, nativo do Grasshopper, onde a partir de um número aleatório (Random), gera um seed, capaz de alimentar as intersecções seguindo as regras estabelecidas. O Script Python, lê o número aleatório, que está associado as regras, a partir da aplicação do primeiro módulo inserido, a geração do módulo seguinte, é fornecida seguindo os critérios estabelecidos na gramática forma.

Cada módulo é associado a um ponto criado, de localização, seguindo os inputs de quantidades de módulos em X e Z. Cada iteração (Figura 40) é realizada em loop (criação da geometria baseada nas regras + localização), quantas vezes definida.

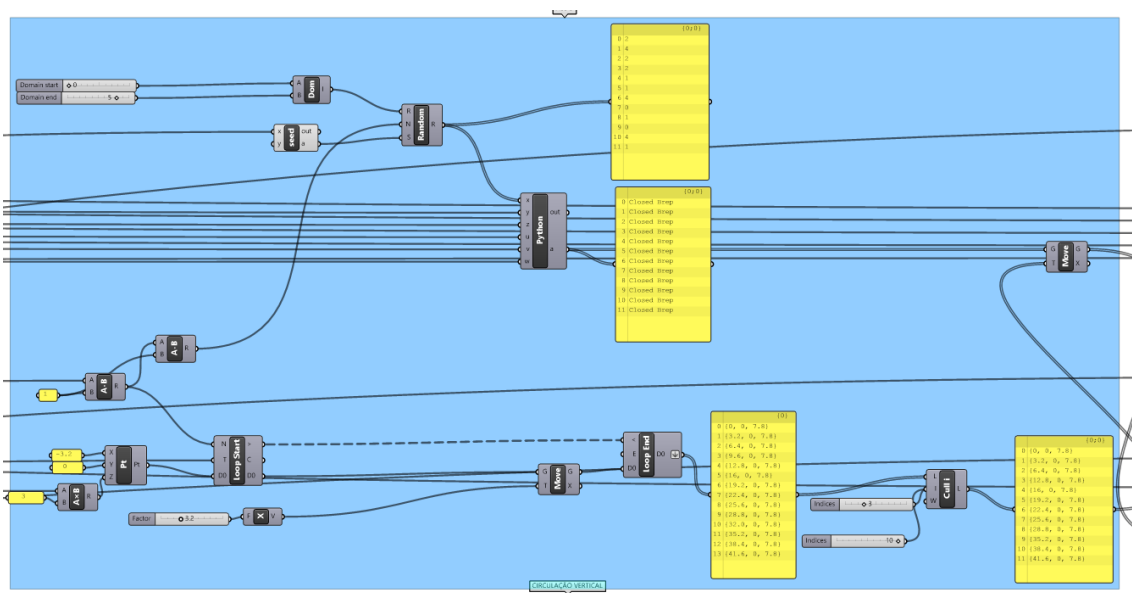


Figura 40 - Destaque 04 Geração de iterações. Fonte: Autora

05. Algoritmo Genético

Algoritmos genéticos (AGs) são métodos computacionais inspirados na evolução biológica, usados para otimização e resolução de problemas (Forrest, 1993). Eles operam em uma população de soluções potenciais codificadas como cromossomos, normalmente representadas como sequências binárias. Os AGs surgiram como uma técnica de otimização poderosa inspirada pela seleção natural e genética, ganhando destaque para resolver problemas complexos em vários domínios (Faizatulhaida Md Isa et al., 2024). Os operadores genéticos fundamentais dos AG incluem seleção, cruzamento e mutação, que desempenham papéis cruciais na manutenção da diversidade e convergência para soluções ótimas. Os AG demonstram notável adaptabilidade ao abordar desafios em campos como engenharia, economia e bioinformática, muitas vezes superando métodos tradicionais ao lidar com grandes espaços de solução. Apesar do cenário em evolução das metodologias computacionais, os AG continuam sendo uma ferramenta essencial para lidar com problemas complexos de otimização do mundo real, destacando sua relevância duradoura e potencial para aplicações futuras (Faizatulhaida Md Isa et al., 2024).

GAs, junto com redes neurais e lógica fuzzy, estão entre os métodos de IA (Figura 41) mais amplamente usados em Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) (A. Darko et al., 2020). Demonstrando a capacidade do GA de lidar com problemas complexos e com múltiplas restrições na construção, oferecendo soluções para redução de custos, otimização de tempo e tomada de decisão. A integração do GA com outras tecnologias como o BIM aumenta ainda mais sua eficácia em lidar com os desafios da indústria.

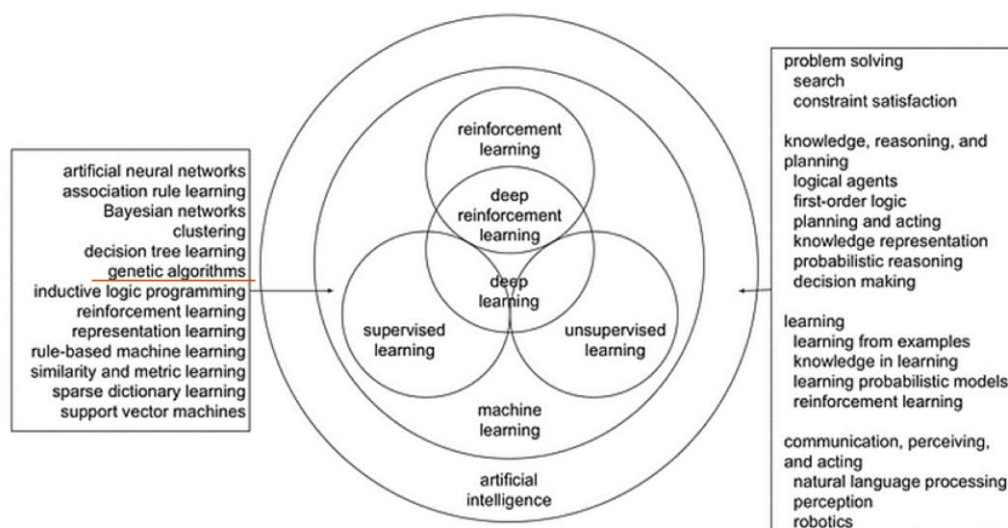


Figura 41 - Diagrama das diversas áreas da Inteligência Artificial Fonte: (Li, 2018)

Os AG's utilizam genótipos (representações codificadas) e fenótipos (soluções expressas), Figura 42, para otimizar problemas complexos. Em aplicações arquitetônicas, os AGs podem otimizar fachadas de edifícios para desempenho energético e iluminação natural (Shahbazi et al., 2019). Em biologia, a relação genótipo-fenótipo é entendida por meio de conjuntos de proteínas, explicando como as mutações genéticas levam a diversos fenótipos diferentes (Nussinov et al.,

2019). Esse conceito inspirou abordagens computacionais em arquitetura generativa, como estratégias evolutivas para geração de padrões (Navarro-Mateu & Cocho-Bermejo, 2020).



Figura 42 - Genótipo e Fenótipo Fonte: Natole, 2019

O plugin Galápagos (Figura 43), um recurso nativo do Grasshopper, é um solucionador algorítmico que emprega técnicas semelhantes a algoritmos evolucionários, mantendo uma população de soluções candidatas e gerando novas por meio de mutações aleatórias ou recombinação de variantes existentes. Em intervalos regulares, a população gerada passa por seleção por meio de funções de aptidão, permitindo que apenas os melhores candidatos sobrevivam nas gerações subsequentes. Com cada iteração em várias gerações, há um aprimoramento gradual na qualidade média da solução.

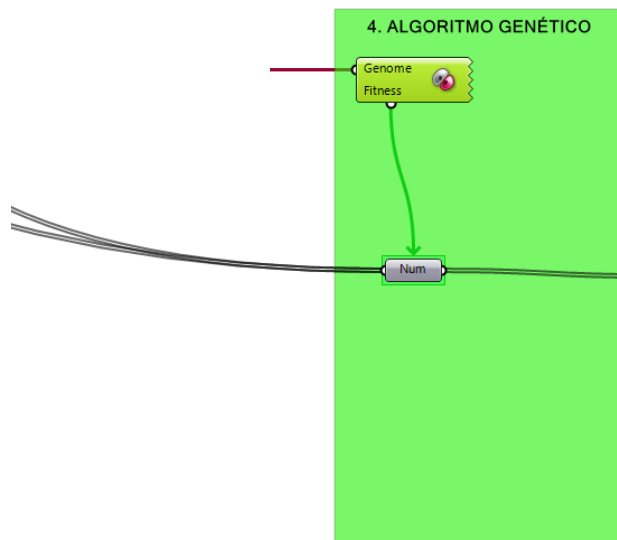


Figura 43 - Destaque 05 - Algoritmo Genético de Otimização

Neste caso, a função de adequação desejada (fitness) foi relacionada ao número de variações das regras. De modo que a otimização pode ser a partir de uma maior variação das regras, e consequentemente da geometria, ou de modo a ter uma menor variação. Essa otimização é realizada a partir da definição de Maximizar ou Minimizar consecutivamente (Figura 44).

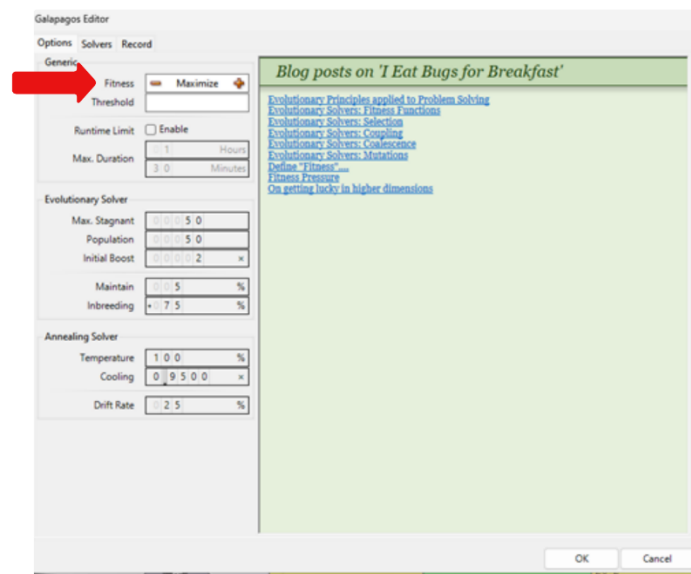


Figura 44 - Configuração da Função Fitness. Fonte: Autora

O Galápagos, usa dois algoritmos (Fitness + Genoma), para gerar conjuntos de valores de parâmetros aleatórios e comparar os valores de aptidão resultantes entre si. Quanto mais variações ele testa, mais soluções "boas" o Galápagos encontra, e ele monitora as melhores soluções com maior aptidão em uma espécie de placar (Figura 45).

É por esse processo que ele é chamado de solucionador evolucionário: inicia-se com conjuntos de parâmetros aleatórios e o algoritmo aprende gradativamente a ajustá-los. Desta forma, ele melhora a eficiência das soluções além da sua qualidade.

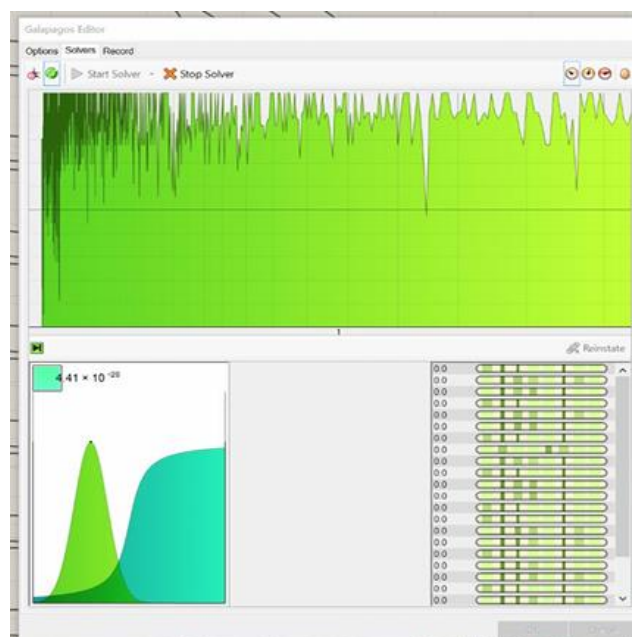


Figura 45 - Execução do Galapagos. Fonte: Autora

Na Figura 46, é retirado uma pequena amostragem dos designs gerados, na integração grasshopper-rhino. o combinar as regras da Gramática de Formas com instrumentos de processamento computacional, um vasto número de soluções formais pode ser gerado para a mesma população. Portanto, para interromper o processamento do algoritmo durante o desenvolvimento deste projeto, um critério de tempo foi estabelecido para a coleta de resultados.

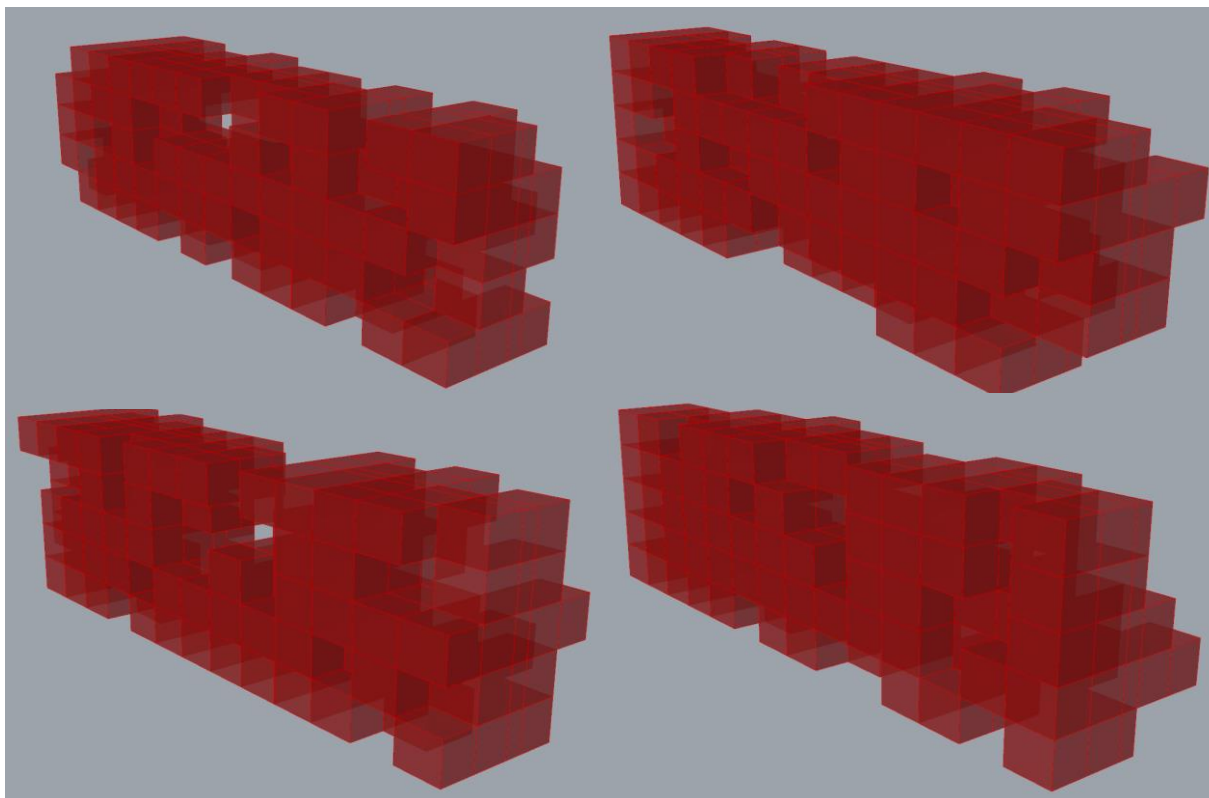


Figura 46 – Amostragem da geração automática e aleatória do Edifício. Fonte: Autora

3.6.3. ARCHICAD-GRASSHOPPER-ARCHICAD

Até agora, conforme discutido em termos de eficiência do fluxo do projeto, a adoção do BIM revolucionou a gestão de projetos, possibilitando a criação de modelos virtuais imersivos e a centralização de todas as informações do projeto, auxiliando todas as partes envolvidas durante os processos de projeto e construção.

A abordagem do Design Generativo libera os designers do processo de modelagem, pois o algoritmo projetado gera várias soluções de design. No entanto, esse método fornece principalmente formas geométricas simples sem informações de construção, o que pode subutilizar as capacidades do BIM.

O Rhino-Grasshopper oferece ferramentas para criar modelos BIM IFC, mas a sua combinação com plataformas BIM específicas potencializa as capacidades de modelagem, visualização e análise dos projetos. A comunicação entre estes sistemas ocorre através do plug-in "Grasshopper-Archicad Live Connection" (Figura 47) e permite de forma direta a verificação da modelagem.

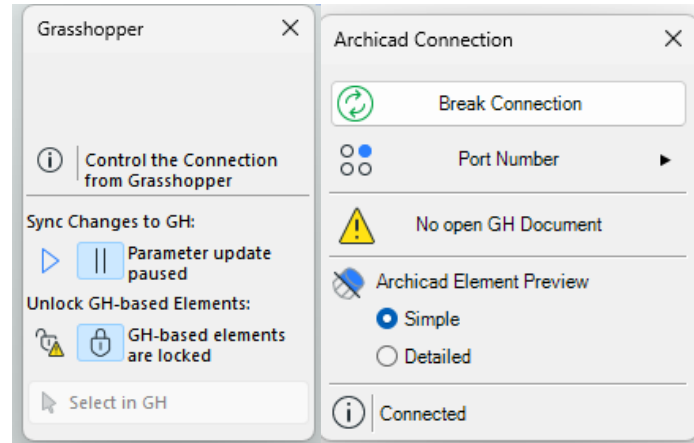


Figura 47 - Grasshopper-Archicad Live Connection. a) No Archicad b) No Grasshopper. Fonte: Autora

Na interface do Grasshopper, é possível criar ou selecionar um objeto existente. A criação é feita a partir da definição de uma forma, enquanto para selecionar um objeto existente no Archicad, é feito através de uma vinculação entre os softwares (Figura 48). Após selecionar ou criar um objeto, pode-se ainda atribuir classificações comuns ao desenvolvimento BIM. Na Figura 49, destaca-se a escolha de um objeto da biblioteca Grasshopper, criado anteriormente e as opções para inputs da classificação do produto (não aplicado nesse caso de estudo).

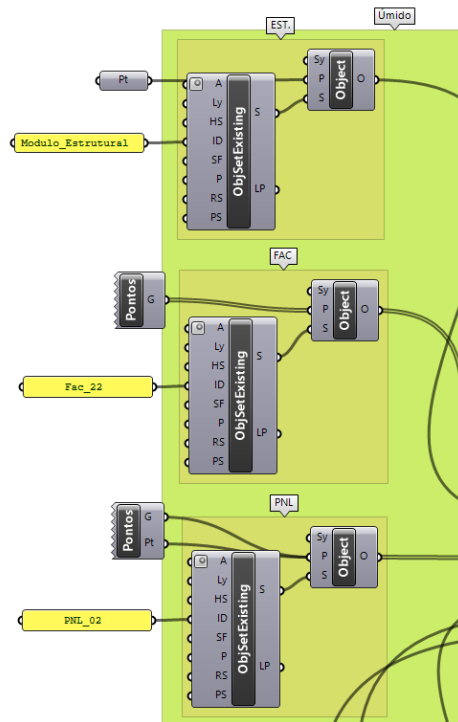


Figura 48 - Modelagem dos componentes Archicad no Grasshopper. Fonte: Autora

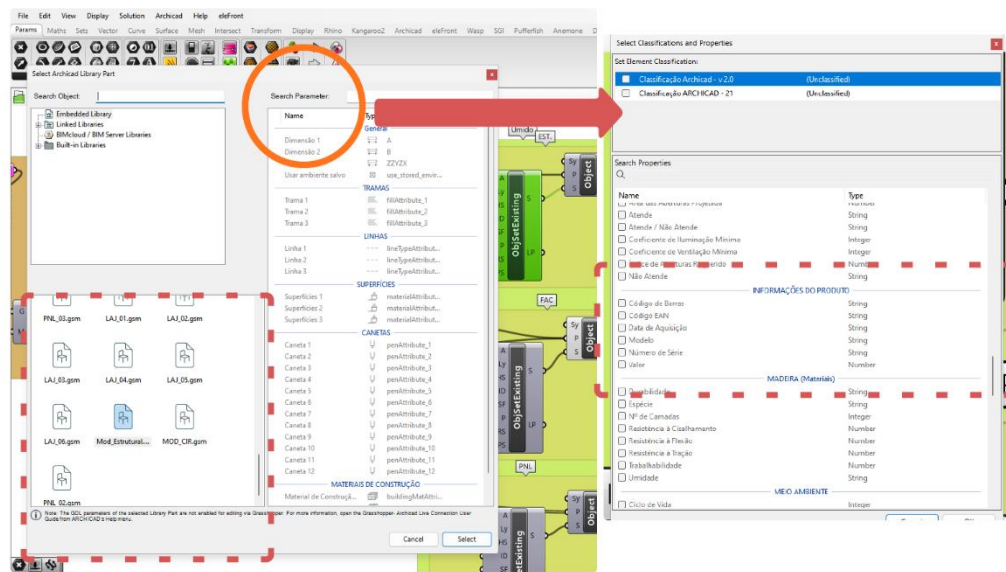


Figura 49 - Acesso Biblioteca Archicad, pelo Grasshopper

A modelagem paramétrica dos elementos gerados do modelo BIM IFC foi definida para atender especificamente ao âmbito formal de um Estudo Preliminar. Na Figura 50, é possível observar o resultado do modelo paramétrico em Grasshopper e em Archicad.

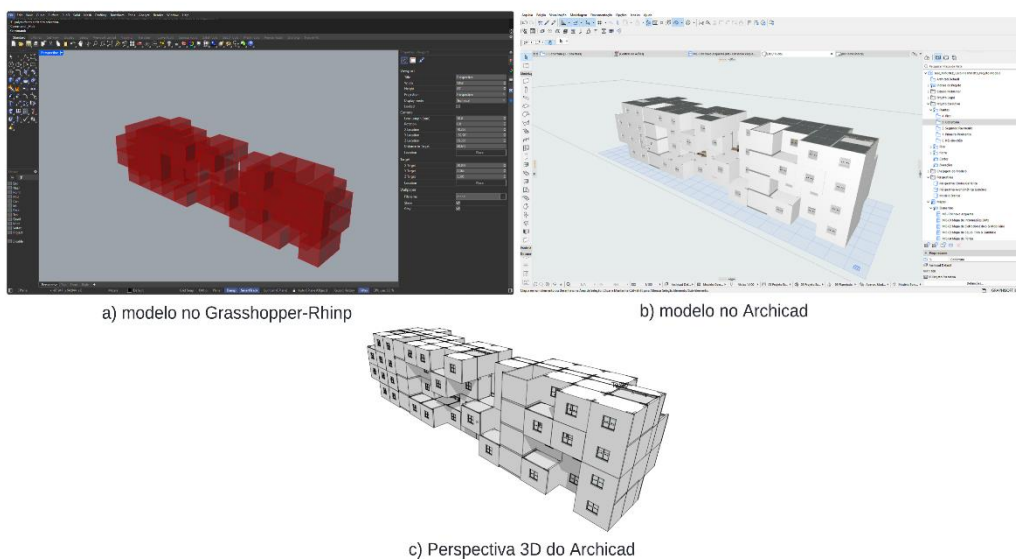


Figura 50 - Comparação entre modelo Grasshopper e Archicad. Fonte: Autora

Se este modelo propõe uma análise automatizada dos modelos gerados, durante o ciclo "Avaliar", torna-se obrigatório garantir que o modelo não tenha informações restritas à geometria. Como visto até agora, as soluções são compostas principalmente por meio da associação de módulos de ambientes.

A Solibri.Inc desenvolveu o software denominado Solibri Model Checker (SMC), cujo objetivo é a análise e avaliação de modelos BIM. O programa opera por meio de um conjunto de regras que visam identificar problemas ou conflitos potenciais, bem como aqueles já revelados no modelo em questão - sendo possível importar o formato IFC para leitura conforme estabelecido pelo modelo da informação (Eastman et al., 2009)

Ele apresenta uma variedade de modelos predefinidos para regras de software (Figura 51), que são altamente personalizáveis e capazes de se adaptar a diversas situações. As cláusulas incluídas em cada modelo podem ser editadas, bem como sua prioridade relativa. A interface é fácil e não requer habilidades específicas em linguagem de programação.

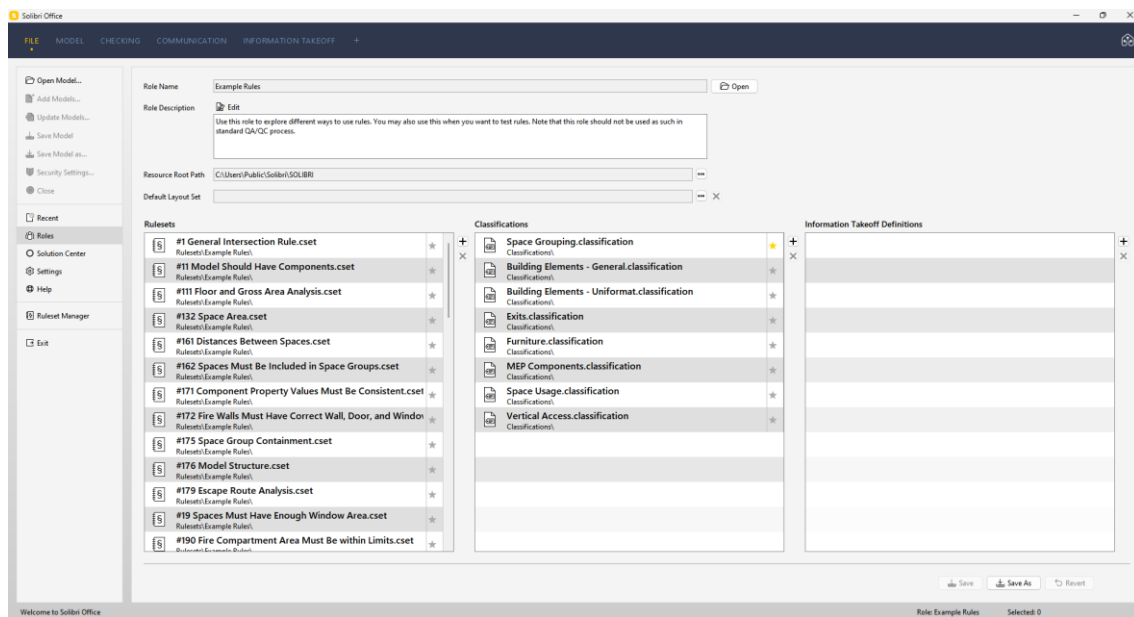


Figura 51 - Templates nativos do software Solibri. Fonte: Autora

O complemento de conexão Archicad-Solibri (Figura 52) fornece verificação rápida e automatizada de código e construtibilidade. O complemento atualizado detecta e envia automaticamente apenas os elementos que são alterados no modelo Archicad, resultando em colaboração de ida e volta mais rápida. Este complemento permite atualizações rápidas de BIM e o uso do Solibri enquanto o projeto é desenvolvido. Projetando, verificando e alterando conforme necessário.

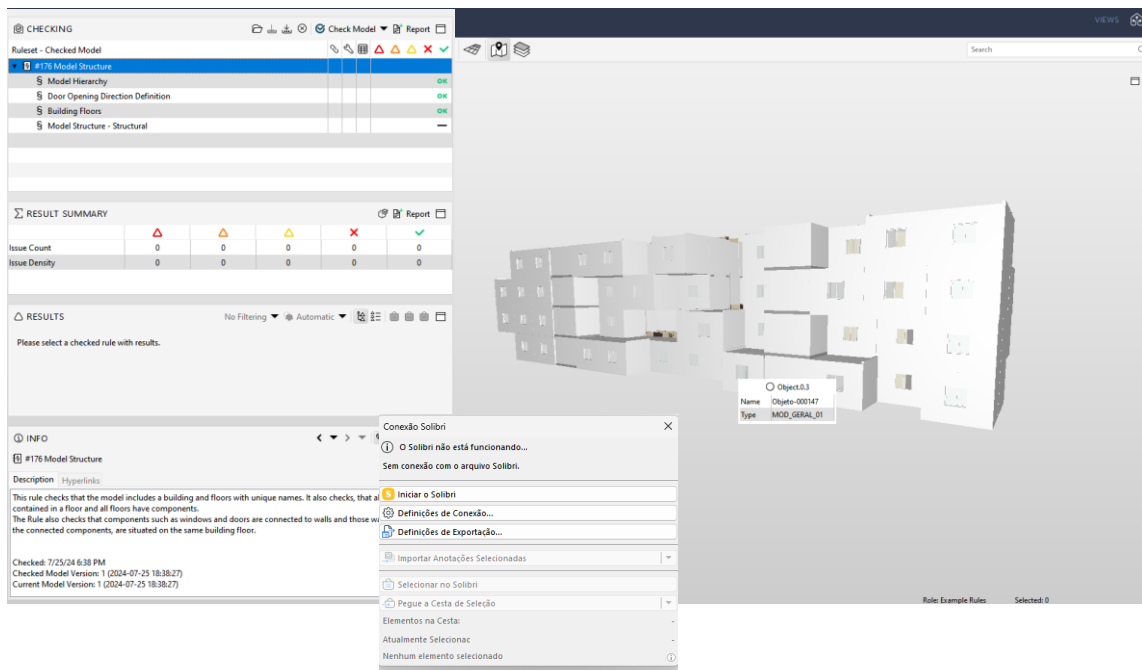


Figura 52 - Conexão Archicad-Solibri Fonte: Autora

Uma vez que as regras estejam parametrizadas, a aplicação nos modelos ocorre de maneira rápida e dinâmica. O Software analisa as condições do modelo perante algumas regras, pré-estabelecidas ou criadas, analisando se atende ou não os seus requisitos (Figura 53).

O software produz um relatório (Figura 53) sinaliza as regras cumpridas e as que apresentam desvios. As não conformidades são exibidas interativamente no modelo, permitindo ao usuário localizar visualmente e compreender rapidamente as inconsistências.

#176 Model Structure	Acc	Rej	Maj	Nor	Min	Comment
Model Hierarchy	OK					
Door Opening Direction Definition	OK					
Building Floors	OK					
Model Structure - Structural	-					

#1 General Intersection Rule	Acc	Rej	Maj	Nor	Min	Comment
Building Services and Doors and Windows	-					
Building Services and Beams and Columns	OK					
Intersections between HVAC and Electrical Models	-					
Intersections in HVAC Models	-					
Wall - Wall Intersections			x			
Door Intersections	OK					
Doors and Windows Shouldn't Intersect with Structural Components	-					

#11 Model Should Have Components	Acc	Rej	Maj	Nor	Min	Comment
Required Components				x		
The Model Should Have Spaces				x		
Electric Cabinets Must Be Defined	-					
Toilet Seats and Basins Must Be Defined				x		

Figura 53 – Recorte de Relatório e Análise pelo Solibri ao modelo IFC. Fonte: Autora

3.7. DOCUMENTAÇÃO

A documentação desempenha um papel crucial no sucesso de projetos de construção pré-fabricada. Sendo fundamentalmente importante para uma especificação de projeto precisa, com comunicação de informações e padronização (Alwisy, 2019). A documentação é essencial para o controle de qualidade, com fatores-chave incluindo sistemas de decomposição adequados e sistemas de garantia de qualidade competentes (Banihashemi, 2018). A documentação adequada oferece suporte à implementação de estruturas organizacionais virtuais, o que pode melhorar o gerenciamento e o desempenho do projeto (Xue et al. 2021). No geral, a documentação abrangente e precisa é fundamental para abordar os desafios exclusivos dos projetos de construção pré-fabricada.

Como ponto de partida para uma documentação robusta, de custos e recursos, foi extraído do modelo BIM, um quadro quantitativo (Tabela 9) que relaciona os elementos, componentes e suas variações na montagem de cada bloco.

Tabela de Elementos e Componentes				Tabela de Elementos e Componentes				Tabela de Elementos e Componentes				Tabela de Elementos e Componentes			
Localização	Qtd.	Módulo	Componentes	Localização	Qtd.	Módulo	Componentes	Localização	Qtd.	Módulo	Componentes	Localização	Qtd.	Módulo	Componentes
Reto do chão	1	MOD_CIRC_01	EST_CIRC LAJ_06	1º Pavimento	1	MOD_CIRC_01	EST_CIRC LAJ_06	2º Pavimento	1	MOD_CIRC_02	EST_CIRC LAJ_06	Cobertura	1	MOD_CIRC_01	EST_CIRC LAJ_06
	6	MOD_CIRC_02	LAJ_06		1	MOD_CIRC_02	EST_CIRC LAJ_06		6	MOD_CIRC_03	EST_CIRC LAJ_06		1	MOD_CIRC_02	EST_CIRC LAJ_06
	6	MOD_CIRC_03	LAJ_06		7	MOD_CIRC_03	EST_CIRC LAJ_06		1	MOD_CIRC_04	EST_CIRC LAJ_06		7	MOD_CIRC_03	EST_CIRC LAJ_06
	1	MOD_CIRC_04	EST_CIRC LAJ_06		1	MOD_CIRC_04	EST_CIRC LAJ_06		3	MOD_CIRC_05	EST_CIRC LAJ_06		1	MOD_CIRC_04	EST_CIRC LAJ_06
	2	MOD_ESCADA	CAIXA_ESCADA ELEVADOR		2	MOD_CIRC_05	EST_CIRC LAJ_06		2	MOD_ESCADA	CAIXA_ESCADA ELEVADOR		2	MOD_CIRC_05	EST_CIRC LAJ_06
	2	MOD_GERAL_01	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_ESCADA	CAIXA_ESCADA ELEVADOR		3	MOD_GERAL_01	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_ESCADA	CAIXA_ESCADA ELEVADOR
	2	MOD_GERAL_02	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_GERAL_01	EST_GERAL LAJ_06		4	MOD_GERAL_02	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_GERAL_01	EST_GERAL LAJ_06
	3	MOD_GERAL_03	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_GERAL_02	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_GERAL_03	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_GERAL_02	EST_GERAL LAJ_06
	3	MOD_GERAL_04	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_GERAL_04	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_GERAL_04	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_GERAL_03	EST_GERAL LAJ_06
	8	MOD_UMD_01	EST_GERAL LAJ_06		4	MOD_UMD_01	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_UMD_01	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_GERAL_04	EST_GERAL LAJ_06
	7	MOD_UMD_02	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_UMD_02	EST_GERAL LAJ_06		6	MOD_UMD_02	EST_GERAL LAJ_06		4	MOD_UMD_01	EST_GERAL LAJ_06
	4	MOD_UMD_03	EST_GERAL LAJ_06		9	MOD_UMD_03	EST_GERAL LAJ_06		9	MOD_UMD_03	EST_GERAL LAJ_06		5	MOD_UMD_02	EST_GERAL LAJ_06
	2	MOD_UMD_05	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_UMD_04	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_UMD_04	EST_GERAL LAJ_06		4	MOD_UMD_03	EST_GERAL LAJ_06
	2	MOD_UMD_05	EST_GERAL LAJ_06		2	MOD_UMD_05	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_UMD_05	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_UMD_04	EST_GERAL LAJ_06
	1	MOD_UMD_06	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_UMD_07	EST_GERAL LAJ_06		1	MOD_UMD_06	EST_GERAL LAJ_06		3	MOD_UMD_05	EST_GERAL LAJ_06

Tabela 9 - Tabela Quantitativa de Componentes e Módulos Archicad. Fonte: Autora

3.8. APLICAÇÃO DE FERRAMENTA DE IA EXISTENTE

A inteligência artificial (IA) emerge como uma força transformadora, permeando diversos setores e impulsionando inovações disruptiva, ao automatizar tarefas, analisar dados e personalizar experiências em massa, como exemplo. No âmbito das ferramentas, a IA assume um papel crucial na expansão de suas capacidades, abrindo novas fronteiras para a otimização de processos, a geração de insights valiosos e a resolução de problemas complexos.

Com o objetivo de validar o estudo apresentado até aqui, destacando como essa tecnologia está revolucionando a maneira como trabalhamos, é desenvolvido um exemplo de aplicação de um software de mercado, anteriormente apresentado, de forma a gerir e analisar de forma profunda. Dessa forma, é demonstrado como a IA pode redefinir o potencial de ferramentas já estabelecidas, impulsionando a eficiência, a produtividade e a criatividade em diversos domínios.

3.8.1 ZENERATE

Segundo (Zenerate.ai, 2024), a Zenerate foi fundada por um arquiteto, um matemático e um engenheiro de software. Harvard, Benji Shin trabalhou como arquiteto em Los Angeles e durante esse tempo, se interessou em automatizar o processo de design para estudos de viabilidade em desenvolvimento imobiliário. Em conjunto com Jamie Jeong, Ph.D. matemático e desenvolvedor de IA da Samsung, eles descobriram que a IA pode não apenas ajudar a automatizar o processo

de design, mas também maximizar os retornos de desenvolvimento no processo inicial de pré-desenvolvimento. Hak Lee, um engenheiro de software apaixonado por design computacional, foi o responsável por desenvolver o primeiro protótipo da Zenerate.

A Zenerate (zenerate.ai, 2024), em conjunto com a SoLa Impact, principal construtora imobiliária privada de moradias populares na Califórnia, desenvolveu uma plataforma com o uso de design generativo, inteligência artificial e análise avançada de dados para otimizar o processo de estudo de viabilidade, reduzindo o tempo de resposta e maximizando os retornos do desenvolvimento.

A integração do software da Zenerate, nas operações modulares da SoLa Impact, facilita a tomada de decisões orientada por dados, permitindo uma avaliação mais eficiente e abrangente de potenciais locais de desenvolvimento, custos de construção e demanda de mercado.

O software, é rodado diretamente na página web, também conhecido como software web-based ou software online (Figura 54) e parte da definição do módulo de projeto. Importante salientar, que o software não distingue ou limita-se ao tipo de construção, e sim a premissa de projeto a partir de módulos de repetição. Podendo ser definido pelo usuário.

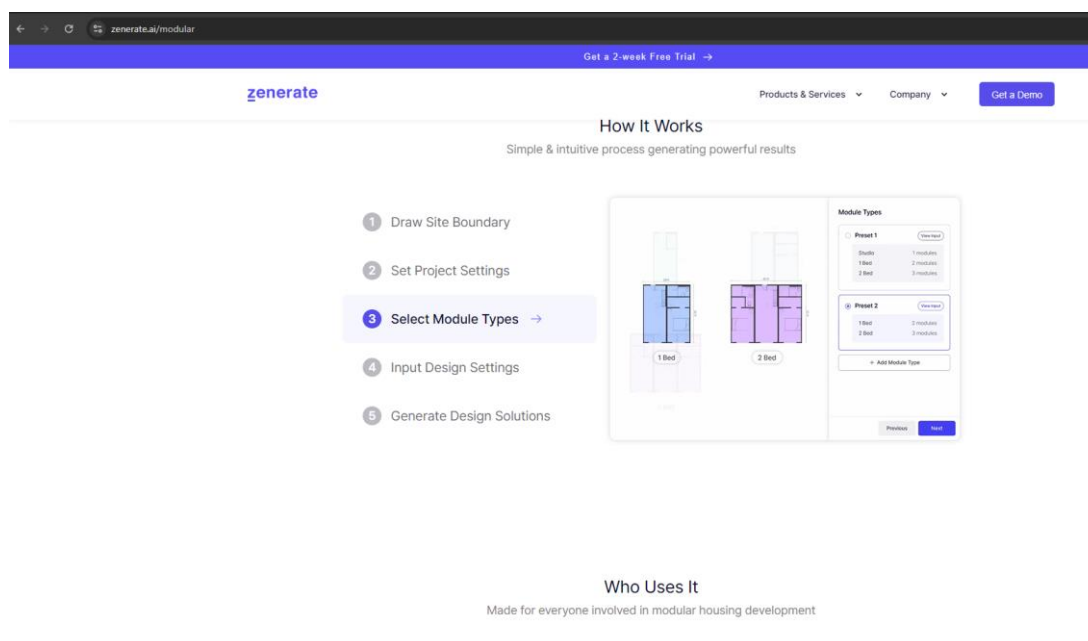


Figura 54 - Interface online Zenerate.modular. Fonte: Zenerate

A interface é fácil uso para arquitetos, engenheiros e fabricantes, de modo não ser necessário conhecimento em programação ou outro tipo de aprendizado avançado.

O Input inicial, como mencionado, é através da identificação da localização (Figura 55) e definição do(s) módulo(s) a serem contemplados (Figura 56). A localização é realizada através de uma barra de pesquisa de endereço e a demarcação manual do terreno, e ainda pode ser indexada, por meio de um arquivo próprio CAD. Já os módulos, podem ser criados de forma personalizada, a partir de dimensões, ou ainda adaptar módulos existentes por tipo de unidade. (Por exemplo apartamento + circulação)

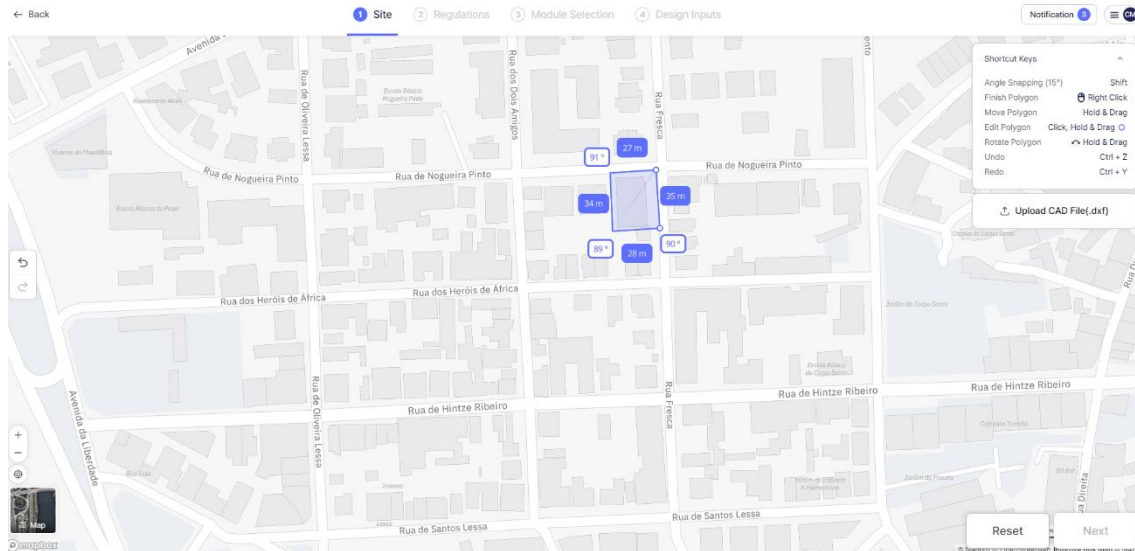


Figura 55 - Definição da localização Fonte: Autora

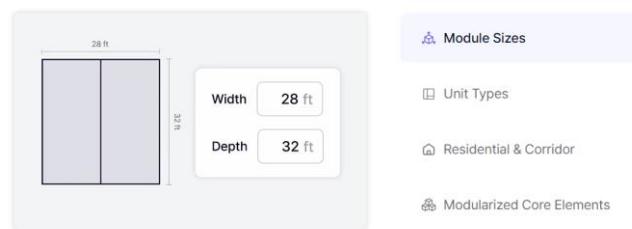


Figura 56 - Criação do módulo Fonte: Autora

Após a identificação do terreno, é necessário estabelecer critérios a serem considerados na composição do edifício, como faces voltadas para a rua, recuos necessários e altura limite da edificação. Apresentado na Figura 57.

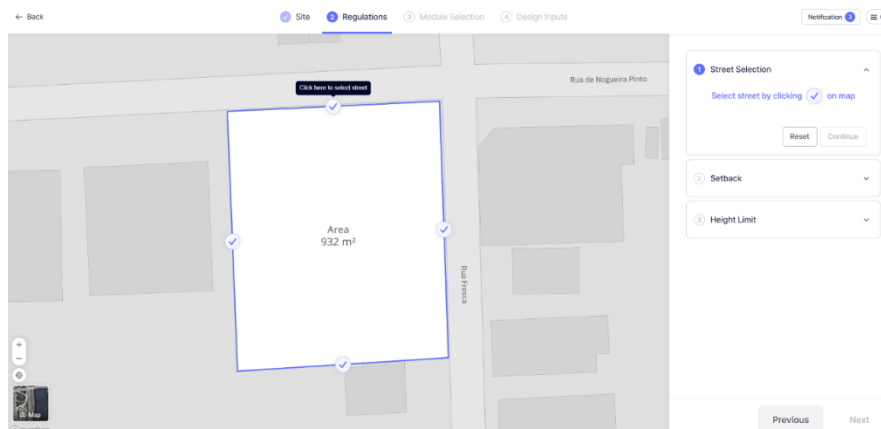


Figura 57 - Definições do Terreno Fonte: Autora

A configuração dos módulos, pode ser determinada ainda pela sua composição quanto ao tipo, de modo que mesmo escolhendo um módulo tipo existente, é possível modificar suas configurações quanto a inserção de circulação. (Figura 58)

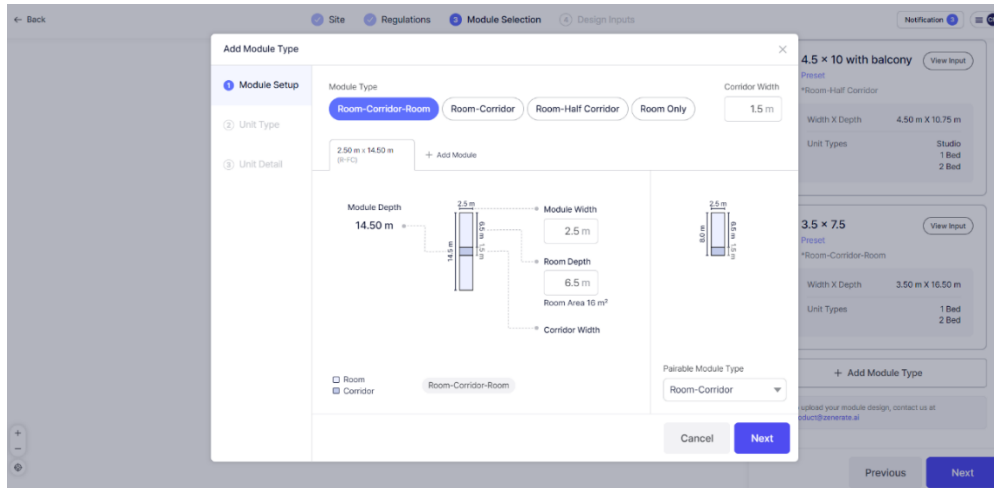


Figura 58 - Definição dos módulos tipos. Fonte: Autora

Na Figura 59, é demonstrado a seleção dos módulos a serem contemplados na geração de opções. E sua relação, de modo que são selecionados, Studio, 1 Bed e 2 Bed, abaixo representado. Também fica identificado, após ajuste, as dimensões de cada um dos módulos tipos.



Figura 59 - Seleção dos módulos a serem utilizados. Fonte: Autora

Como parte final da configuração da geração dos modelos, é possível selecionar os tipos de composições a serem geradas, denominada “tipos de massa” (Destacado em vermelho na Figura 60). Conforme o dimensionamento livre de implementação do terreno, alguns tipos de composições, podem não serem possíveis. Entre alguns recursos opcionais disponíveis, estão a inserção de estacionamento, com números de vagas a serem contempladas e o percentual sugerido de cada tipo de unidade do módulo (Destacado em laranja na Figura 60).

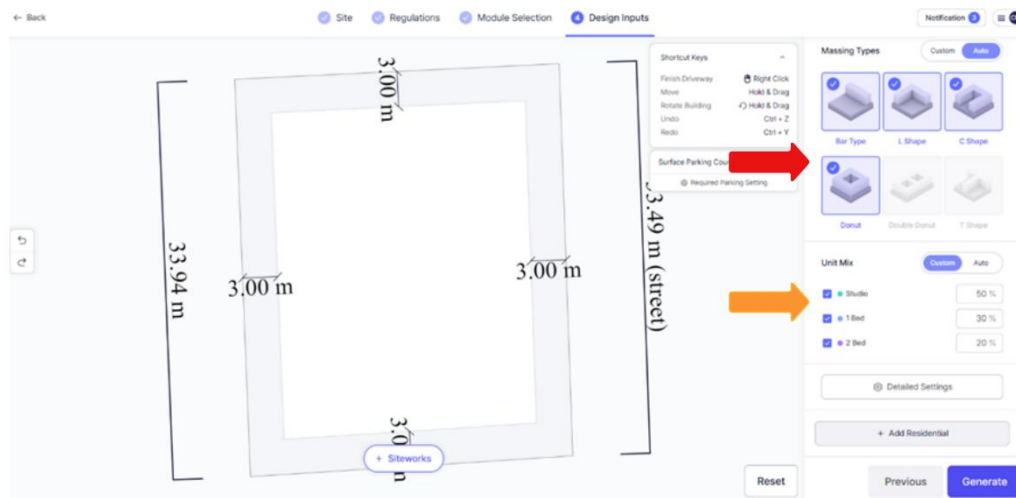


Figura 60 - Ajustes finais quanto a composição do edifício. Fonte: Autora

A geração das opções é feita de forma rápida, e abrangente. As variações não são limitadas quanto ao número de opções, sendo que a partir de determinada solicitação pode resultar mais ou menos variações conforme os inputs adicionados (Figura 61).

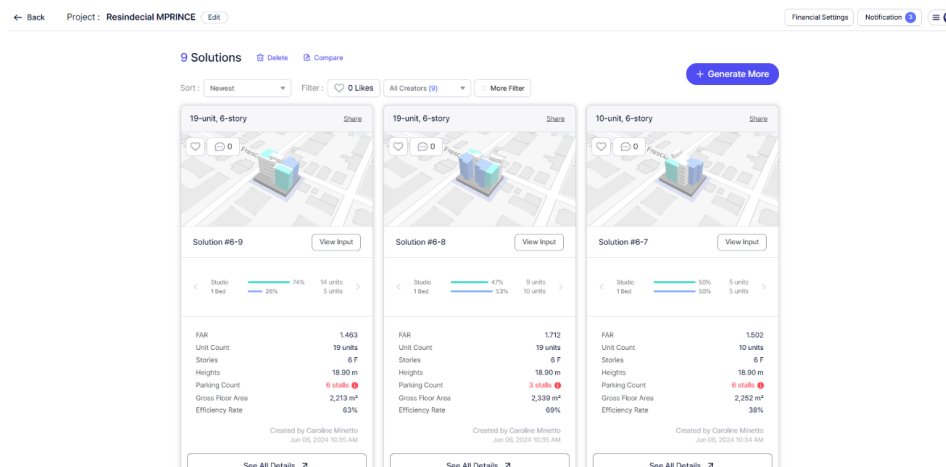


Figura 61 - Opções Geradas a partir dos inputs apresentados. Fonte: Autora

Os resultados permitem ainda gerir e comparar cenários (Figura 62) de design instantaneamente com base na densidade, variações de unidades, layouts de construção, soluções de estacionamento, entre outros.

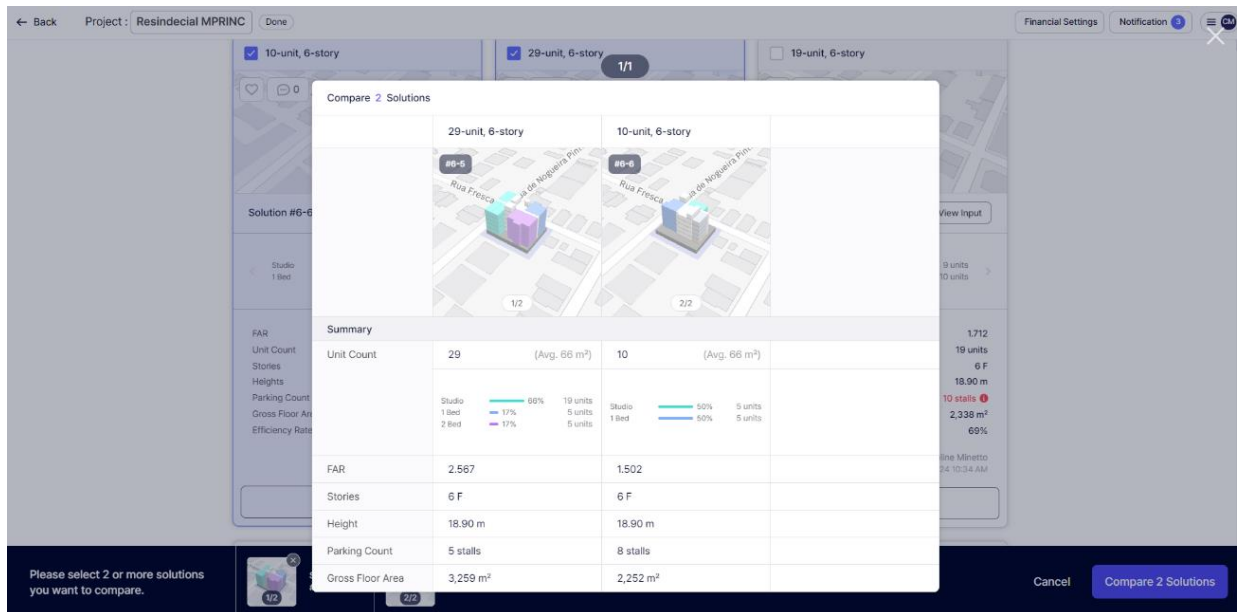


Figura 62 - Comparação de duas opções escolhidas. Fonte: Autora

As análises individuais das opções, podem ser feitas a partir do Layout interno de cada nível, ou ainda a partir de um diagrama de fachadas, identificado cada orientação e sua área. Tais informações permitem uma análise tanto a nível de distribuição e concepção do edifício, como a níveis técnicos como conforto térmico. Tais análises estão demonstradas na Figura 63.

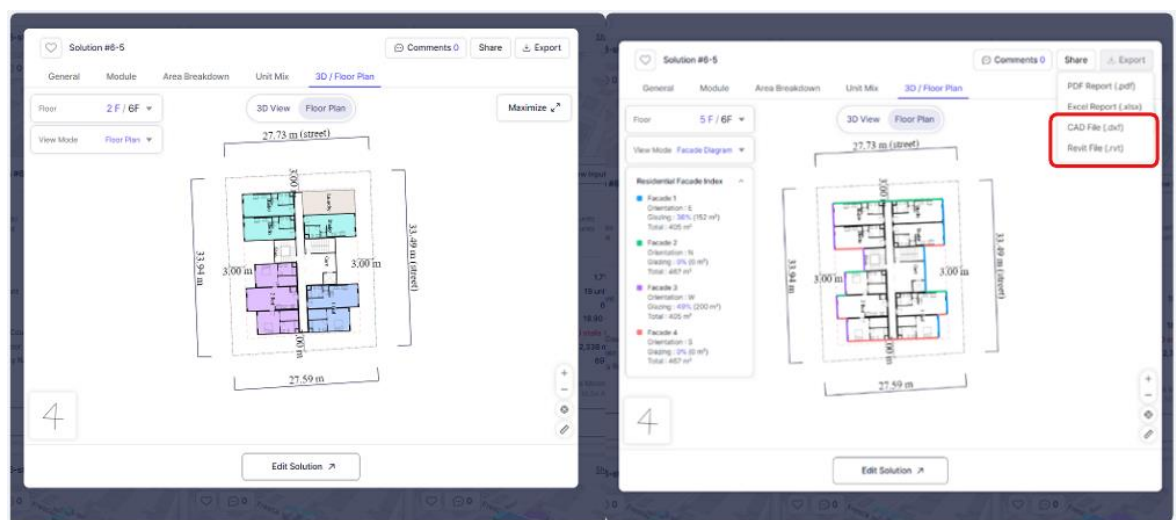


Figura 63 - Análise de Layout e Orientação das Fachadas, Fonte: Autora

As visualizações podem ser por plantas baixas (de cada pavimento), ou em um modelo 3D interativo.

Após a escolha, ou escolhas das composições de maior interesse, é possível exportar o arquivo (planta + 3D), com extensão em pdf, dxf e rvt (Destacado em vermelho na Figura 63). Sendo particularmente interessante a exportação para um arquivo BIM, nesse caso Revit. Isso permite que o projeto possa ser desenvolvido e ajustado, de forma facilitada a partir do modelo inicial exportado.

O software demonstrou grandes vantagens e praticidade em termos de gerações em massa do edifício, além de um grande comparador para as análises entre as opções gerados. Beneficiando arquitetos e engenheiros, para uma otimização de tarefas repetitivas (geração de modelo + análise), mostrando rapidamente a viabilidade do local, podendo ainda fornecendo uma estimativa de custo.

4

CONCLUSÃO

4.1. CONCLUSÃO GERAL

A construção modular é um promissor solucionador para construções rápidas e com qualidade controlada, aproximando-se ainda mais da industrialização. Através da pré-fabricação de módulos em ambiente controlado e da sua posterior montagem no local da obra, a construção modular proporciona maior eficiência, sustentabilidade e qualidade aos projetos. A construção modular reduz significativamente o tempo total do projeto, desde a concepção até a conclusão, devido à padronização dos módulos e à otimização dos processos de produção e montagem. Contribuindo para a sustentabilidade da construção, através da redução de resíduos no canteiro de obras, do menor consumo de materiais e energia durante a fabricação dos módulos, e da possibilidade de utilização de materiais reciclados e sustentáveis. Ainda, proporciona um ambiente de trabalho mais seguro para os trabalhadores, pois grande parte das atividades é realizada em ambiente fabril controlado, minimizando os riscos de acidentes no canteiro de obras.

Apesar dos seus diversos benefícios, a construção modular também apresenta desafios no investimento inicial em um projeto modular, mas que pode ser compensada pelos ganhos de eficiência e qualidade ao longo do ciclo de vida do projeto. A logística da construção modular requer um planejamento cuidadoso, desde a produção dos módulos até o seu transporte e montagem no local da obra. É fundamental considerar fatores como o tamanho e peso dos módulos, as distâncias envolvidas e as condições de acesso ao canteiro de obras.

O Design for Manufacture and Assembly (DfMA) surge como uma filosofia inovadora na indústria da construção, impulsionando a transição para um paradigma industrializado. Através da otimização de projetos para fabricação e montagem. O DfMA visa reduzir o tempo de construção, através da otimização os processos de fabricação e montagem em ambientes controlados. A padronização de componentes e a otimização do processo de produção proporcionam economias significativas nos custos de construção. A fabricação em ambientes controlados e a padronização rigorosa garantem um alto nível de qualidade nas edificações. O DfMA também facilita a implementação de controles de qualidade em todas as etapas do processo. A adoção do DfMA exige uma mudança significativa na mentalidade da indústria da construção, que tradicionalmente se baseia em métodos artesanais. As empresas e profissionais

precisam estar dispostos a se adaptar a um novo paradigma industrializado. Tal paradigma impacta diversos aspectos no processo de projeto, com a otimização para a produção como um fator central no desenvolvimento. A padronização e a modularidade inerentes ao DfMA podem, em alguns casos, limitar a flexibilidade do design. Sendo importante encontrar um equilíbrio entre os benefícios da padronização e a necessidade de atender às necessidades específicas de cada projeto. A logística do transporte e da instalação de componentes pré-fabricados, especialmente em áreas remotas, pode ser um desafio. É necessário planejar cuidadosamente a logística para garantir a viabilidade do projeto. O sucesso do DfMA depende da estreita colaboração entre diferentes disciplinas, como arquitetura, engenharia e fabricação. A integração eficaz dessas áreas é fundamental para garantir um processo de projeto e construção fluido e eficiente.

A indústria da construção está em um momento crucial de transformação digital, impulsionada pela integração de tecnologias inovadoras como a Inteligência Artificial (IA). A IA, em conjunto com o BIM (Building Information Modeling) e a metodologia DfMA (Design for Manufacturing and Assembly), oferece um potencial inexplorado para otimizar a construção modular, elevando a eficiência, a produtividade e a sustentabilidade do setor.

A IA atua como um catalisador para a geração e análise de opções de design modular, expandindo o leque de soluções e identificando alternativas inovadoras. Através de algoritmos paramétricos, a IA permite explorar uma gama ampla de variáveis, desde o tamanho e a função das unidades até os materiais e restrições de código de construção. Essa flexibilidade abre caminho para projetos mais eficientes, que atendem às necessidades específicas de cada cliente e local. Enquanto o BIM se consolida como uma plataforma central para a integração de dados de projeto, engenharia e construção.

A metodologia DfMA, com sua ênfase na padronização e industrialização da construção, cria um terreno fértil para a aplicação da IA. A natureza padronizada dos componentes modulares facilita a parametrização e a otimização por meio de algoritmos inteligentes. A IA pode automatizar tarefas repetitivas, como a geração de documentação técnica e a análise de viabilidade de projetos, liberando tempo e recursos para atividades mais estratégicas.

A implementação da IA na construção modular enfrenta alguns desafios, como a fragmentação do setor, a necessidade de dados rotulados para aprendizado de máquina e a compatibilidade com processos e práticas existentes. No entanto, o potencial da IA é imenso, e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento continuam a crescer.

A indústria da construção está no limiar de uma nova era, impulsionada pela inteligência artificial e pela promessa de um futuro mais eficiente, sustentável e resiliente. A integração da IA na construção modular é um passo crucial nessa jornada, abrindo caminho para projetos inovadores e transformadores que moldarão o futuro da indústria.

4.2. CONCLUSÃO DO PROJETO

O design paramétrico emerge como uma ferramenta transformadora na arquitetura e construção modular, abrindo um leque de possibilidades para otimização de projetos, exploração criativa e integração de dados. Através da parametrização de variáveis de projeto, arquitetos e engenheiros podem explorar um vasto espaço de soluções, ajustando parâmetros como dimensões, formas, materiais e conexões para encontrar soluções inovadoras e eficientes. Facilita, ainda, a criação de

formas complexas, isso abre novas possibilidades para a arquitetura modular, permitindo a criação de designs inovadores e expressivos.

A implementação do design paramétrico exige conhecimento avançado e habilidades em ferramentas de software específicas. Isso pode ser um obstáculo para profissionais sem experiência prévia em modelagem paramétrica. A integração de diferentes softwares e sistemas de modelagem paramétrica junto com a falta de padronização nos formatos de dados e interfaces de comunicação dificulta a troca de informações entre equipes.

A adoção do design paramétrico pode exigir adaptações nos fluxos de trabalho e nas estruturas organizacionais das empresas, além de investimentos em softwares, hardwares e treinamento de funcionários. Para um maior aproveitamento, deve ser integrado com conhecimentos em áreas como estrutural, eficiência energética e sustentabilidade para garantir o desempenho adequado do edifício e minimizar o impacto ambiental.

Esta tese apresentou a elaboração de um projeto paramétrico, na busca pela industrialização da construção modular, utilizando princípios evolutivos, algoritmos de IA e tecnologias BIM paramétricas. Foi explorado o potencial do design paramétrico e BIM para otimizar o projeto de construção modular, aproximando-se da automação. De modo a atender três principais etapas:

Exploração Criativa: A parametrização permite explorar diversas configurações e gerar designs únicos, adaptáveis às necessidades do projeto.

Otimização: Algoritmos evolutivos otimizam parâmetros de projeto, como dimensões, formas, materiais e conexões, buscando soluções que atendam a critérios específicos e melhorem o desempenho geral do projeto.

Integração de Dados: O BIM paramétrico integra dados de diversas fontes, como requisitos de projeto, informações de materiais, dados de sensores e feedback de usuários, permitindo a criação de modelos mais informativos e decisões mais assertivas. Dessa forma, contribuindo significativamente para a industrialização da construção modular.

A metodologia proposta se baseou na interoperação entre dois softwares: Archicad (BIM) e Rhino-Grasshopper (design paramétrico). O Archicad define os componentes e elementos modulares, enquanto o Rhino-Grasshopper gera diferentes soluções de projeto com base em regras paramétricas e princípios de construção modular e DfMA.

A aplicação da metodologia em um projeto de edifício modular demonstrou seu potencial para otimização do número de peças e padronização de componentes, através, da exploração de novas formas e soluções arquitetônicas.

Apesar dos avanços, ainda existem desafios a serem superados, como a complexidade técnica, a interoperabilidade de softwares e a necessidade de mudanças organizacionais. No entanto, o potencial do design paramétrico e da inteligência artificial na construção modular é imenso. Com o desenvolvimento contínuo de ferramentas e metodologias, essa tecnologia tem o potencial de revolucionar a forma como projetamos e construímos no futuro, impulsionando a eficiência, a sustentabilidade e a criatividade neste setor crucial para o desenvolvimento social e econômico.

Dessa forma, essa tese, contribuiu para o estudo da integração de design paramétrico e inteligência artificial na construção modular, com o desenvolvimento de uma metodologia para otimizar o processo de projeto e construção, explorando soluções condicionadas pelos requisitos.

A pesquisa apresentada contribui significativamente para a industrialização da construção modular, com o potencial de transformar a forma como construímos edifícios no futuro. Os resultados desta tese podem ser utilizados por arquitetos, engenheiros, empresas de construção e outros profissionais que buscam otimizar seus projetos e construir edifícios mais eficientes, sustentáveis e inovadores.

4.3. REPERCUSSÕES FUTURAS

A tese apresentada abre um leque de oportunidades e desafios para o futuro da arquitetura modular. A metodologia proposta, com base em algoritmos evolutivos e design paramétrico, otimiza projetos modulares de forma significativa, considerando diversos requisitos do projeto integrado.

A integração de critérios de sustentabilidade nos algoritmos de otimização pode levar a projetos modulares com menor impacto ambiental, assim como outros requisitos de projetos, desde estrutural até o urbano. A liberdade de design permite a criação de formas complexas e inovadoras, que antes eram limitadas por métodos tradicionais.

A tese contribui para a democratização do conhecimento em design paramétrico e inteligência artificial na arquitetura modular, ao apresentar uma metodologia clara e acessível. A pesquisa abre caminho para que mais profissionais possam se beneficiar dessa tecnologia, impulsionando a inovação e a criatividade no setor.

O desenvolvimento contínuo de ferramentas e metodologias, juntamente com a crescente adoção de tecnologias digitais, indica um futuro ainda mais promissor para a arquitetura modular. A otimização de projetos e a redução de custos refletem em áreas ainda mais amplas quanto a sociedade, tornar a habitação modular mais acessível para a população em geral e ser um solucionador para cenários pós catástrofe, são alguns exemplos de como a construção modular pode ser resiliente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abazid, M.A., Gökçekuş, H., & Celik, T. (2019). Study of the Quality Concepts Implementation in the Construction of Projects in Saudi Arabia by using Building Information Modelling (BIM).
- Abd Razak, M.I., Khoiry, M.A., Wan Badaruzzaman, W.H., & Hussain, A.H. (2022). DfMA for a Better Industrialised Building System. Buildings.
- Abrishami, S., & Martín-Durán, R. (2021). BIM and DfMA: A Paradigm of New Opportunities. Sustainability.
- Aftab, I., Kapitany, K., & Lovas, T. (2023). Automating Scan to BIM Operations Using Grasshopper. Periodica Polytechnica Civil Engineering.
- Ajouz, R. (2021). Parametric design of steel structures. Steel Construction, 14.
- Akinosho, T.D., Oyedele, L.O., Bilal, M., Ajayi, A.O., Delgado, M.D., Akinadé, O.O., & Ahmed, A.A. (2020). Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. Journal of building engineering, 32, 101827.
- Akinradewo, O., Aigbavboa, C.O., Aghimien, D., Oke, A.E., & Ogunbayo, B.F. (2021). Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges. International Journal of Construction Management, 23, 1344 - 1354.
- Al-Azzawi, T., & Al-Majidi, Z. (2021). Parametric architecture: the second international style. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1067.
- Alfieri, E., Seghezzi, E., Sauchelli, M., Di Giuda, G.M., & Masera, G. (2020). A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. Architectural Engineering and Design Management, 16, 247 - 269.
- Ali, T.H., Akhund, M.A., Memon, N.A., Memon, A.H., Imad, H.U., & Khahro, S.H. (2019). Application of Artificial Intelligence in Construction Waste Management. 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), 50-55.
- Alwisy, A., Bu Hamdan, S., Barkokébas, B., Bouferguene, A., & Al-Hussein, M. (2019). A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. International Journal of Construction Management, 19, 187 - 205.
- Antony, K.M., & Arunkumar, S. (2020). DFMA and Sustainability Analysis in Product Design. Journal of Physics: Conference Series, 1455.
- Aphirakmethawong, J., Yang, E., & Mehnen, J. (2022). An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing. 2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC), 1-6.

- Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2022). Design for Adaptability (DfA)—Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings. *Applied System Innovation*.
- Baduge, S.K., Thilakarathna, S., Perera, J.S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *_Automation in Construction_*.
- Baltus, V., & Žebrauskas, T. (2019). Parametric Design Concept in Architectural Studies. *Architecture and Urban Planning*, 15, 96 - 100.
- Banihashemi, S., Tabadkani, A., & Hosseini, M. (2018). Integration of parametric design into modular coordination: A construction waste reduction workflow. *Automation in Construction*, 88, 1-12.
- Banks, C., Kotecha, R., Curtis, J., Dee, C.L., Pitt, N., & Papworth, R. (2018). Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly – a UK case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*.
- Bashir, H.A., & Ojiako, U. (2020). An integrated ISM-MICMAC approach for modelling and analysing dependencies among engineering parameters in the early design phase. *Journal of Engineering Design*, 31, 461 - 483.
- Bassir, D., Lodge, H., Chang, H., Majak, J., & Chen, G. Application of artificial intelligence and machine learning for BIM: review.
- Bauguess, Brooke. ICON Unveils New Construction Technologies for Lowest Cost, Fastest, and Most Sustainable Way to Build at Scale, Icon Build, 2023. Disponível em: <https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-unveils-new-construction-technologies-for-lowest-cost-fastest-and-most-sustainable-way-to-build-at-scale> Acesso em: Maio de 2024.
- Beulah, F. (2022). Challenges Faced in Prefabrication or Modular Construction. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.
- Bogodukhova, E., Britvina, V.V., Bobrova, E., Gavriluk, A.V., & Sorokin, A. (2021). Creation of architectural forms by combining additive and information technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 2001.
- Bölek, B., Tural, O., & Özbaşaran, H. (2023). A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*.
- Bolpagni, M., & Bartoletti, I. (2021). Artificial Intelligence in the Construction Industry: Adoption, Benefits and Risks.
- Borhani, A., Dossick, C.S., Meek, C., Kleiner, D., & Haymaker, J.R. (2018). Adopting Parametric Construction Analysis in Integrated Design Teams. *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*.

- BOTTAZZI, Roberto. Architectural Style Wars at the Royal College of Art. The Architectural Review, 2012. Disponível em: <https://www.architectural-review.com/essays/architectural-style-wars-at-the-royal-college-of-art> Acesso em: Maio de 2024.
- Brown, N.C., Jusiega, V., & Mueller, C.T. (2020). Implementing data-driven parametric building design with a flexible toolbox. *Automation in Construction*, 118, 103252.
- Burggräf, P., Bergs, T., Dannapfel, M., Korff, A., Ebade Esfahani, M., Splettstoesser, A., & Steinlein, J. (2021). Achieving parametric transparency in model-based factory planning. *Production Engineering*, 15, 57-67.
- Canestrino, G. (2021). Use of parametric approach for user-oriented development in building design: preliminary investigations. The Academic Research Community publication.
- Cao, Y., Zandi, Y., Agdas, A.S., Wang, Q., Qian, X., Fu, L., Wakil, K., Selmi, A., Issakhov, A., & Roco-Videla, Á. (2021). A review study of application of artificial intelligence in construction management and composite beams. *Steel and Composite Structures*, 39, 685.
- Chen, H., & Ying, K. (2022). Artificial Intelligence in the Construction Industry: Main Development Trajectories and Future Outlook. *Applied Sciences*.
- Cheng, Z., Tang, S., Liu, H., & Lei, Z. (2023). Digital Technologies in Offsite and Prefabricated Construction: Theories and Applications. *Buildings*.
- Choi, J.O., Chen, X., & Kim, T.W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. *International Journal of Construction Management*, 19, 105 - 93.
- Chong, O.W., & Zhang, J. (2019). Game Simulation to Support Construction Automation in Modular Construction Using BIM and Robotics Technology—Stage I. *Computing in Civil Engineering* 2019.
- Cook, P., Jammooa, D., Hjorth-Jensen, M., Lee, D.D., & Lee, D. (2024). Parametric Matrix Models. *ArXiv*, abs/2401.11694.
- Cruz-Ramírez, L.C. (2019). Parametric design in the restoration project. *Gremium*, 6, 102-115.
- Cudzik, J., & Radziszewski, K. (2019). Parametric design in architectural education.
- Daher, E., Kubicki, S., & Pak, B. (2018). Participation-based Parametric Design in Early Stages A participative design process for spatial planning in office building.
- Darko, A., Chan, A.P., Adabre, M.A., Edwards, D.J., Hosseini, M.R., & Ameyaw, E.E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*, 112, 103081.
- Doroshenko, A.I. (2020). Applying Artificial Neural Networks in Construction. *E3S Web of Conferences*.
- Eber, W. (2019). Artificial Intelligence in Construction Management – a Perspective. *Proceedings of the Creative Construction Conference* 2019.

Eber, W. (2020). Potentials of artificial intelligence in construction management. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, 12, 2053 - 2063.

Elshani, D., Wortmann, T., & Staab, S. (2022). Towards Better Co-Design with Disciplinary Ontologies: Review and Evaluation of Data Interoperability in the AEC Industry. LDAC@ESWC.

Farouk, A., Eldaly, H., & Dewidar, K.M. (2019). PARAMETRIC DESIGN AS A TOOL FOR PERFORMATIVE ARCHITECTURE. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*.

Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A.C., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. *Engineering Structures*.

Frangedaki, E., Sardone, L., Marano, G.C., & Lagaros, N.D. (2022). Optimisation driven design in architectural, engineering and construction industry: an overview. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*.

Fuchkina, E., Schneider, S., Bertel, S., & Osintseva, I. (2018). A modular approach to flexibly explore large sets of design variants of parametric models within a single environment.

Gao, S., Jin, R., & Lu, W. (2019). Design for manufacture and assembly in construction: a review. *Building Research & Information*, 48, 538 - 550.

Gilner, E., Gałuszka, A., & Grychowski, T. (2019). Application of Artificial Intelligence in Sustainable Building Design - Optimisation Methods. 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 81-86.

Ginosar, R., Kloper, H., & Zoran, A. (2018). PARAMETRIC HABITAT: Virtual Catalog of Design Prototypes. *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*.

Graciano, A., & Prado, G. (2020). Considerations on Parametric Design and Generative Design.

Greenough, T., Smith, M., & Mariash, A. (2019). Integrating Computational Design to Improve the Design Workflow of Modular Construction. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*.

Gu, N., Yu, R., & Behbahani, P.A. (2021). Parametric Design: Theoretical Development and Algorithmic Foundation for Design Generation in Architecture. *_Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences_*.

Gupta, M., & Kumar, S. (2019). Design Efficiency Analysis Towards Product Improvement Using DFMA. 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 1-6.

Higashi, M., Senga, H., Nakamura, A., & Hosaka, M. (2002). Parametric Design Method Based on Topological and Geometrical Constraints. *Workshop on Geometric Modeling*.

Hooda, Y., Kuhar, P., Sharma, K.K., & Verma, N.K. (2021). Emerging Applications of Artificial Intelligence in Structural Engineering and Construction Industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1950.

Hořínková, D. (2021). Advantages and Disadvantages of Modular Construction, including Environmental Impacts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203.

<https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/dfma-overlay-to-the-riba-plan-of-work> acessado em: outubro, 2023.

Hyun, H., Kim, H., & Kim, J. (2022). Integrated Off-Site Construction Design Process including DfMA Considerations. *Sustainability*.

Iacovidou, E., Purnell, P., Tsavdaridis, K.D., & Poologanathan, K. (2021). Digitally Enabled Modular Construction for Promoting Modular Components Reuse: A UK View. *Journal of building engineering*, 102820.

IKIZ, Serra Utkum. Tim Fu wants “to explore the radical alternative and push the machine’s creative autonomy”, *Parametric Architecture*, 2023. Disponível em: <https://parametric-architecture.com/tim-fu-wants-to-explore-the-radical-alternative-and-push-the-machines-creative-autonomy/> Acesso em: Maio de 2024.

Innella, F., Arashpour, M., & Bai, Y. (2019). Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. *Journal of Construction Engineering and Management-asce*, 145, 04019076.

Ji, L. (2022). Application and Optimization of Artificial Intelligence Technology in Architectural Design. *Wireless Communications and Mobile Computing*.

Karthik, S., Kermanshachi, S., & Behzad, R. (2020). Modular Construction vs. Traditional Construction: Advantages and Limitations: A Comparative Study. *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020*.

Keshavarzi, M., Hutson, C., Cheng, C., Nourbakhsh, M., Bergin, M.J., & Asl, M.R. (2020). SketchOpt: Sketch-based Parametric Model Retrieval for Generative Design. *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.

Khamis, A.A., Ibrahim, S.A., Khateb, M.A., Abdel-Fatah, H.T., & Barakat, M.A. (2022). Introducing the Architecture Parametric Design Procedure: From Concept to Execution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1056.

Kolugala, L.M., Pan, W., & Kumaraswamy, M.M. (2022). A dialectical system framework for adopting modular integrated construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101.

Kyivska, K., & Tsiutsiura, S. (2021). Implementation of artificial intelligence in the construction industry and analysis of existing technologies. *Technology audit and production reserves*, 2, 12-15.

- Laovisutthichai, V., & Lu, W. (2022). Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework. *Smart and Sustainable Built Environment*.
- Laovisutthichai, V., Lu, W., & Xue, F. (2021). Modular Construction: Design Considerations and Opportunities. *Proceedings of the 25th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*.
- Lapidus, A.A., Kuzhin, M.F., & Shesterikova, I. (2020). Construction project organizational and technological parameters analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869.
- Lee, J., & Hyun, H. (2019). Multiple Modular Building Construction Project Scheduling Using Genetic Algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Leone, M.F., & Nocerino, G. (2021). Advanced modelling and digital manufacturing: Parametric design tools for the optimization of UHPFRC (ultra high-performance Fiber reinforced concrete) shading panels. *Automation in Construction*, 126, 103650.
- Li, H., Brockmöller, T., Gembarski, P.C., & Lachmayer, R. (2020). AN INVESTIGATION OF A GENERATIVE PARAMETRIC DESIGN APPROACH FOR A ROBUST SOLUTION DEVELOPMENT. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 315 - 324.
- Liewa, J.Y., Daia, Z., & Chuua, Y.S. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings.
- Loizou, L., Barati, K., Shen, X., & Li, B. (2021). Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation. *Buildings*.
- Lu, W., Tan, T., Xu, J., Wang, J., Chen, K., Gao, S., & Xue, F. (2020). Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new. *Architectural Engineering and Design Management*, 17, 77 - 91.
- Luo, L., Yan, Z., Yang, D., Xie, J., & Wu, G. (2018). BIM Application in the Whole Life Cycle of Construction Projects in China.
- Mainzer, K. (2020). *Verifikation und Sicherheit für Neuronale Netze und Machine Learning*.
- Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2019). A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. *Automation in Construction*.
- Mohammadi, M., Kurvinen, E., & Mikkola, A. (2019). A Design Process to Parameterize a Real-Time Simulation Model of a Commercial Vehicle. *International Review of Mechanical Engineering-IREME*, 13, 673-681.
- Mohol, N., & Bambawale, A. (2023). Understanding the Role of Rhino as a Parametric Tool in Designing Architectural Built-Forms.
- Morandin-Ahuerma, Fabio. What is Artificial Intelligence. [s. l.], v. 3, n. 12, 2022

- Musa, M.F., Mohammad, M.F., Mahbub, R., & Yusof, M.R. (2018). Adopting Modular Construction in the Malaysian Construction Industry. *Asian Journal of Environment-Behaviour Studies*.
- Na, S., Heo, S., Choi, W., Kim, C.M., & Whang, S. (2023). Artificial Intelligence (AI)-Based Technology Adoption in the Construction Industry: A Cross National Perspective Using the Technology Acceptance Model. *Buildings*.
- Nasir, O., & Arif, K. (2023). Exploring the role of parametric architecture in building design: An inclusive approach. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*.
- Naumov, A.E., Kucherenko, A., Bobrovnikov, E., & Korolskaya, A. (2022). PARAMETRIC LIBRARY ELEMENTS AS AN EFFECTIVE TOOL FOR IMPROVING INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov*.
- Ng, MS e Hall, DM (2019). Rumo ao gerenciamento Lean para fabricação digital: uma revisão das práticas compartilhadas de Lean, DfMA e dfab. *Processo. 27ª Conferência Anual do Grupo Internacional para Construção Enxuta (IGLC)*.
- Nguyen, T.D., Moon, H., & Ahn, Y.H. (2022). Critical Review of Trends in Modular Integrated Construction Research with a Focus on Sustainability. *Sustainability*.
- Niphadkar, P.A., & Niphadkar, A.P. (2022). Strategies for Parametric Design in Architecture. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*.
- Nordestgaard, P., Jensen, J.M., Mortensen, P., Wyrzt, M., Mikulénas, M., & Trifan, A. (2019). APPLICATION OF PARAMETRIC DESIGN IN PROJECT CONTAINING STEEL STRUCTURES: PARAMETRIC LIGHT-RAIL STEEL BRIDGE. *ce/papers*, 3.
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517.
- Parveen, D.R. (2019). Artificial Intelligence in construction industry: Legal issues and Regulatory Challenges.
- Pena, M.L., Carballal, A., Rodriguez-Fernandez, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture. *Automation in Construction*, 124, 103550.
- Peter (2022). Correlation between modular construction and sustainability in the building life cycle.
- Pillai, V.S., & Matus, K.J. (2021). Towards a responsible integration of artificial intelligence technology in the construction sector. *Science and Public Policy*.
- Rampini, L., & Cecconi, F.R. (2022). Artificial intelligence in construction asset management: a review of present status, challenges and future opportunities. *J. Inf. Technol. Constr.*, 27, 884-913.

Rankohi, S., Bourgault, M., Iordanova, I., & Carbone, C. (2023). Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework. *Buildings*.

Rankohi, S., Carbone, C., Iordanova, I., & Bourgault, M. (2022). Design-for-Manufacturing-and-Assembly (DfMA) for the construction industry: A review. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*.

Real estate developer partners with AI startup to automate affordable housing developments, *Buildings*, 2023. Disponível em: <https://www.buildings.com/resiliency-sustainability/health-wellness-iaq/article/33018580/real-estate-developer-partners-with-ai-startup-to-automate-affordable-housing-developments> Acesso em: Maio de 2024.

Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R.Y. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*.

Reisinger, J., Knoll, M., & Kovacic, I. (2020). Parametric Structural Design for automated Multi-Objective Optimization of Flexible Industrial Buildings. *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*.

Reshetnikova, E.S., Savelyeva, I.A., & Svistunova, E.A. (2020). Geometric modeling and development of custom libraries in the design of engineering facilities.

Riekstins, A. (2018). TEACHING PARAMETRICISM AS A STANDARD SKILL FOR ARCHITECTURE. *JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBANISM*.

Romaniak, K., & Filipowski, S. (2018). Parametric design in the education of architecture students.

Rossi, F., Arfelli, S., Hu, S., Tolio, T.A., & Freiheit, T. (2019). A systematic methodology for the modularization of manufacturing systems during early design. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1-44.

Roxas, C.L., Bautista, C.R., Dela Cruz, O.G., Dela Cruz, R.L., de Pedro, J.P., Dungca, J., Lejano, B.A., & Ongpeng, J.M. (2023). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) and Design for Deconstruction (DfD) in the Construction Industry: Challenges, Trends and Developments. *Buildings*.

Safaa, Y.P., Hatmoko, J.U., & Purwanggono, B. (2019). Evaluation of the use of prefabricated bridge elements with Design for Manufacture and Assembly (DfMA) criteria. *MATEC Web of Conferences*.

Salama, T., Figgess, G., Elsharawy, M., & Elsokkary, H. (2020). Financial Modeling for Modular and Offsite Construction. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*.

Savio, R.D., & Ali, J.M. (2023). Artificial Intelligence in Project Management & Its Future. *Saudi Journal of Engineering and Technology*.

- Seff, A., Zhou, W., Richardson, N., & Adams, R.P. (2021). Vitruvion: A Generative Model of Parametric CAD Sketches. ArXiv, abs/2109.14124.
- Semochkin, A.V., Bendik, A.N., Nesterov, I.V., & Postgraduate, N.–. (2022). APPLICATIONS OF PARAMETRIC AND BUILDING INFORMATION MODELING METHODS IN THE CONTEXT OF DIGITAL CONSTRUCTION LIBRARY. Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction.
- Shchekin, A.V. (2019). Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization. Engineering Technologies and Systems.
- Shukla, A.K., Janmajaya, M., Abraham, A., & Muhuri, P.K. (2019). Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988-2018). Eng. Appl. Artif. Intell., 85, 517-532.
- Smith, C.J., & Wong, A.T. (2022). Advancements in Artificial Intelligence-Based Decision Support Systems for Improving Construction Project Sustainability: A Systematic Literature Review. Informatics, 9, 43.
- Stals, A., Elsen, C., & Jancart, S. (2022). Integration of parametric modeling tools in small architectural offices – between constraints and organizational strategies. Architectural Engineering and Design Management, 18, 759 - 773.
- Tee, R., Davies, A., & Whyte, J.K. (2018). Modular designs and integrating practices: Managing collaboration through coordination and cooperation. Research Policy.
- Teschemacher, T., & Bletzinger, K. (2023). CAD-integrated parametric modular construction design. Engineering Reports, 5.
- Thai, H., Ngo, T.D., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. Structures, 28, 1265-1290.
- Thajudeen, S., Lennartsson, M., Elgh, F., & Persson, P. (2020). Parametric Modelling of Steel Connectors in a Glulam Based Post and Beam Building System - Towards a Flexible Product Platform Approach. TE.
- Thirunavukkarasu, K., Kanthasamy, E., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Rajanayagam, H., Suntharalingam, T., & Dissanayake, M. (2021). Sustainable Performance of a Modular Building System Made of Built-Up Cold-Formed Steel Beams. Buildings.
- Trautmann, L. (2021). Product customization and generative design. Multidiszciplináris tudományok.
- Tsvetkova, T., & Kerenchev, N. (2020). Review of open source software for modelling and analysis of structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 951.
- Tuvayanond, W., & Prasittisopin, L. (2023). Design for Manufacture and Assembly of Digital Fabrication and Additive Manufacturing in Construction: A Review. Buildings.

- Wang, S.C. (2020). Application Research of Artificial Intelligence Technology in Landscape Architectural Art Design. International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence.
- Wasim, M., Vaz Serra, P., & Ngo, T.D. (2020). Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review. International Journal of Construction Management, 22, 3014 - 3022.
- Wrigley, P.A., Wood, P., O'Neill, S., Hall, R., & Robertson, D. (2021). Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review. Progress in Nuclear Energy, 134, 103664.
- Xu, Y., Zhou, Y., Sekuła, P., & Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning.
- Young, D., Panthi, K., & Noor, O. (2021). Challenges Involved in Adopting BIM on the Construction Jobsite.
- Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. Automation in Construction, 88, 13-22.
- Zamim, S.K. (2021). Identification of crucial performance measurement factors affecting construction projects in Iraq during the implementation phase. Cogent Engineering, 8.
- Zhou, C., Chai, C., Liao, J., Chen, Z., & Shi, J. (2020). Artificial intelligence augmented design iteration support. 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 354-358.

5

ANEXOS

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DE EQUIPAMENTO E SOFTWARES UTILIZADOS.

- Computador:
 - Modelo: Samsung Galaxy Book Pro 360
 - Processador: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz 2.80 GHz
 - Memória: 16,0 GB
 - Sistema Operacional: Windows 11 Pro
- Softwares:
 - Leitura e Revisão Bibliométrica:
 - Mendeley
 - Vosviewer
 - Design Paramétrico:
 - Rhinoceros 8
 - Grasshopper
 - Galapagos
 - Anemone
 - Python
 - Wasp
 - Grasshopper-Archicad Live Connection
 - BIM:
 - Archicad 27 Solo
 - Grasshopper-Archicad Live Connection
 - Solibri-Archicad
 - Avaliação do Sistema BIM:
 - Solibri
 - Tratamento de Dados:
 - Microsoft Excel

Anexo B - MÉTODO ORDINÁTIO

Construção Modular						
Articles on technology transfer model (autor, year, journal)	Impact factor (phase 6)	Citations (phase 6)	Year (phase 6)	ALFA	ANO ATUAL	InOrdinatio (phase 7)
Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A.C., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. <i>Engineering Structures</i> .	5,5	318	2019	8	2024	358,0
Thai, H., Ngo, T.D., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. <i>Structures</i> , 28, 1265-1290.	4,1	140	2020	8	2024	188,0
Xu, Z., Zayed, T.M., & Niu, Y. (2020). Comparative analysis of modular construction practices in mainland China, Hong Kong and Singapore. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 245, 118861.	11,1	131	2020	8	2024	179,0
Wang, M., Wang, C., Sepasgozar, S.M., & Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. <i>Buildings</i> .	3,8	129	2020	8	2024	177,0
Goh, M.W., & Goh, Y. (2019). Lean production theory-based simulation of modular construction processes. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	122	2019	8	2024	162,0
Liewa, J.Y., Daia, Z., & Chuua, Y.S. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings.	3,8	123	2018	8	2024	155,0
Razkenari, M., Fenner, A.E., Shojaei, A., Hakim, H., & Kibert, C.J. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. <i>Journal of building engineering</i> , 29, 101138.	6,4	88	2020	8	2024	136,0
Kamali, M., Hewage, K.N., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. <i>Energy and Buildings</i> , 204, 109479.	6,7	93	2019	8	2024	133,0
Innella, F., Arashpour, M., & Bai, Y. (2019). Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. <i>Journal of Construction Engineering and Management-asce</i> , 145, 04019076.	5,1	92	2019	8	2024	132,0
Li, M. (2023). Investigation of the Severity of Modular Construction Adoption Barriers with Large-Scale Group Decision Making in an Organization from Internal and External Stakeholder Perspectives. <i>Computer Modeling in Engineering & Sciences</i> .	2,4	60	2023	8	2024	132,0
Li, X., Lu, W., Xue, F., Wu, L., Zhao, R., Lou, J., & Xu, J. (2022). Blockchain-Enabled IoT-BIM Platform for Supply Chain Management in Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	64	2022	8	2024	128,0
Choi, J.O., Chen, X., & Kim, T.W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 105 - 93.	3,9	87	2019	8	2024	127,0
Li, X., Wu, L., Zhao, R., Lu, W., & Xue, F. (2021). Two-layer Adaptive Blockchain-based Supervision model for off-site modular housing production. <i>Comput. Ind.</i> , 128, 103437.	1,99	64	2021	8	2024	120,0
Hsu, P., Aurisicchio, M., & Angeloudis, P. (2019). Risk-averse supply chain for modular construction projects. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	64	2019	8	2024	104,0
Abdul Nabi, M., & El-adaway, I.H. (2020). Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	55	2020	8	2024	103,0
Yang, Y., Pan, M., Pan, W., & Zhang, Z. (2021). Sources of Uncertainties in Offsite Logistics of Modular Construction for High-Rise Building Projects. <i>Journal of Management in Engineering</i> , 37, 04021011.	7,4	45	2021	8	2024	101,0
Zheng, Z., Zhang, Z., & Pan, W. (2020). Virtual prototyping- and transfer learning-enabled module detection for modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> , 120, 103387.	10,3	44	2021	8	2024	100,0
Yang, Y., Pan, M., & Pan, W. (2019). 'Co-evolution through interaction' of innovative building technologies: The case of modular integrated construction and robotics. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	59	2019	8	2024	99,0
Jeong, G., Kim, H., Lee, H., Park, M., & Hyun, H. (2021). Analysis of safety risk factors of modular construction to identify accident trends. <i>Journal of Asian Architecture and Building Engineering</i> , 21, 1040 - 1052.	1,5	41	2021	8	2024	97,0
Ali, A.H., Kineber, A.F., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., & Daoud, A.O. (2023). Modelling the role of modular Construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects. <i>Journal of Building Engineering</i> .	6,4	24	2023	8	2024	96,0
Ali, A.H., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., Kineber, A.F., & Daoud, A.O. (2023). Modelling the relationship between modular construction adoption and critical success factors for residential projects in developing countries. <i>International Journal of Construction Management</i> , 24, 1314 - 1325.	3,9	23	2023	8	2024	95,0
Wu, L., Lu, W., Zhao, R., Xu, J., Li, X., & Xue, F. (2022). Using Blockchain to Improve Information Sharing Accuracy in the Onsite Assembly of Modular Construction. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	30	2022	8	2024	94,0
Hammad, A.W., Akbarnezhad, A., Wu, P., Wang, X., & Haddad, A.N. (2019). Building information modelling-based framework to contrast conventional and modular construction methods through selected sustainability factors. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	11,1	53	2019	8	2024	93,0

Taghaddos, H., Hermann, U., & Abbasi, A. (2018). Automated Crane Planning and Optimization for modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	59	2018	8	2024	91,0
Pan, W., Parker, D., & Pan, M. (2023). Problematic Interfaces and Prevention Strategies in Modular Construction. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	19	2023	8	2024	91,0
Akinradewo, O., Aigbavboa, C.O., Aghimien, D., Oke, A.E., & Ogunbayo, B.F. (2021). Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges. <i>International Journal of Construction Management</i> , 23, 1344 - 1354.	3,9	35	2021	8	2024	91,0
Zhang, Z., & Pan, W. (2021). Multi-criteria decision analysis for tower crane layout planning in high-rise modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	31	2021	8	2024	87,0
Hassan Ali, A., Farouk Kineber, A., Jibril Obied Qaralleh, T., Sultan Alaboud, N., & Osama Daoud, A. (2023). Classifying and evaluating enablers influencing modular construction utilization in the construction sector: A fuzzy synthetic evaluation. <i>Alexandria Engineering Journal</i> .	6,2	15	2023	8	2024	87,0
Pan, W., & Zhang, Z. (2023). Benchmarking the Sustainability of Concrete and Steel Modular Construction for Buildings in Urban Development. <i>SSRN Electronic Journal</i> .	2,4	15	2023	8	2024	87,0
Jiang, Y., Liu, X., Wang, Z., Li, M., Zhong, R.Y., & Huang, G.Q. (2023). Blockchain-enabled digital twin collaboration platform for fit-out operations in modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	14	2023	8	2024	86,0
Greer, F., & Horvath, A. (2023). Modular construction's capacity to reduce embodied carbon emissions in California's housing sector. <i>Building and Environment</i> .	7,1	12	2023	8	2024	84,0
Wu, L., Li, X., Zhao, R., Lu, W., Xu, J., & Xue, F. (2022). A blockchain-based model with an incentive mechanism for cross-border logistics supervision and data sharing in modular construction. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	11,1	19	2022	8	2024	83,0
Iacovidou, E., Purnell, P., Tsavdaridis, K.D., & Poologanathan, K. (2021). Digitally Enabled Modular Construction for Promoting Modular Components Reuse: A UK View. <i>Journal of building engineering</i> , 102820.	6,4	27	2021	8	2024	83,0
Li, H., Zhang, C., Song, S., Demirkesen, S., & Chang, R. (2020). Improving Tolerance Control on Modular Construction Project with 3D Laser Scanning and BIM: A Case Study of Removable Floodwall Project. <i>Applied Sciences</i> , 10, 8680.	5,6	35	2020	8	2024	83,0
Ali, A.H., Kineber, A.F., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., & Daoud, A.O. (2024). Application of Ginni's mean analysis for identifying the stationary driver enhancing modular construction adoption in the building industry. <i>International Journal of Construction Management</i> .	3,9	3	2024	8	2024	83,0
Jang, H., Ahn, Y., & Roh, S. (2022). Comparison of the Embodied Carbon Emissions and Direct Construction Costs for Modular and Conventional Residential Buildings in South Korea. <i>Buildings</i> .	3,8	19	2022	8	2024	83,0
Liu, Q., Ma, Y., Chen, L., Pedrycz, W., Skibniewski, M.J., & Chen, Z. (2024). Artificial intelligence for production, operations and logistics management in modular construction industry: A systematic literature review. <i>Inf. Fusion</i> , 109, 102423.	1	3	2024	8	2024	83,0
Hussein, M., Karam, A., Eltoukhy, A.E., Darko, A., & Zayed, T.M. (2023). Optimized multimodal logistics planning of modular integrated construction using hybrid multi-agent and metamodeling. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	10	2023	8	2024	82,0
Abdul Nabi, M., & El-adaway, I.H. (2021). Understanding the Key Risks Affecting Cost and Schedule Performance of Modular Construction Projects. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	7,4	26	2021	8	2024	82,0
Ali, A.H., Kineber, A.F., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., & Daoud, A.O. (2023). Identifying and assessing modular construction implementation barriers in developing nations for sustainable building development. <i>Sustainable Development</i> .	12,5	9	2023	8	2024	81,0
Mayouf, M., Jones, J., Elghaish, F., Emam, H., Ekanayake, E.M., & Ashayeri, I. (2024). Revolutionising the 4D BIM Process to Support Scheduling Requirements in Modular Construction. <i>Sustainability</i> .	3,9	1	2024	8	2024	81,0
Peter (2022). Correlation between modular construction and sustainability in the building life cycle.	1	17	2022	8	2024	81,0
Ezzeddine, A.K., & García de Soto, B. (2021). Connecting teams in modular construction projects using game engine technology. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	24	2021	8	2024	80,0
Dong, Y., Hu, Y., Li, S., Cai, J., & Han, Z. (2024). BIM and Blockchain-Based Automatic Asset Tracking in Digital Twins for Modular Construction. <i>Computing in Civil Engineering</i> 2023.	4,7	0	2024	8	2024	80,0
Loizou, L., Barati, K., Shen, X., & Li, B. (2021). Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation. <i>Buildings</i> .	3,8	24	2021	8	2024	80,0
Aulia, D., Husin, A.E., & Imron, A. (2024). Dynamic model in modular construction on high-rise residential buildings based risk manageability to increase project time performance. THE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY IN RESEARCH (QIR) 2021 IN CONJUNCTION WITH THE 6TH ITREC 2021 AND THE 2ND CAIC-SIUD.	1	0	2024	8	2024	80,0
Li, X., Wu, C., Xue, F., Yang, Z., Lou, J., & Lu, W. (2022). Ontology-based mapping approach for automatic work packaging in modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	15	2022	8	2024	79,0
Lee, D., Wen, L., Choi, J.O., & Lee, S. (2023). Sensor-Integrated Hybrid Blockchain System for Supply Chain Coordination in Volumetric Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	7	2023	8	2024	79,0

Khan, A.M., Yu, R., Liu, T., Guan, H., & Oh, E. (2022). Drivers towards Adopting Modular Integrated Construction for Affordable Sustainable Housing: A Total Interpretive Structural Modelling (TISM) Method. <i>Buildings</i> .	3,8	15	2022	8	2024	79,0
Panahi, R., Louis, J., Podder, A., Swanson, C., & Pless, S. (2023). Bottleneck Detection in Modular Construction Factories Using Computer Vision. <i>Sensors (Basel, Switzerland)</i> , 23.	3,4	7	2023	8	2024	79,0
Feldmann, F.G., Birkel, H., & Hartmann, E. (2022). Exploring barriers towards modular construction – A developer perspective using fuzzy DEMATEL. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	11,1	14	2022	8	2024	78,0
Yang, Z., & Lu, W. (2023). Facility layout design for modular construction manufacturing: A comparison based on simulation and optimization. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	6	2023	8	2024	78,0
Pan, M., Yang, Y., Zheng, Z., & Pan, W. (2022). Artificial Intelligence and Robotics for Prefabricated and Modular Construction: A Systematic Literature Review. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	14	2022	8	2024	78,0
Bello, A.O., Eje, D.O., Idris, A.M., Semiu, M.A., & Khan, A.A. (2023). Drivers for the implementation of modular construction systems in the AEC industry of developing countries. <i>Journal of Engineering, Design and Technology</i> .	1,5	6	2023	8	2024	78,0
Zhang, Z., Wong, M.O., & Pan, W. (2023). Virtual reality enhanced multi-role collaboration in crane-lift training for modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	5	2023	8	2024	77,0
Li, X., Han, S., Gul, M., & Al-Hussein, M. (2019). Automated post-3D visualization ergonomic analysis system for rapid workplace design in modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	37	2019	8	2024	77,0
Loo, B.P., & Wong, R.W. (2023). Towards a Conceptual Framework of Using Technology to Support Smart Construction: The Case of Modular Integrated Construction (MiC). <i>Buildings</i> .	3,8	5	2023	8	2024	77,0
Liu, C., Sepasgozar, S.M., Shirowzhan, S., & Mohammadi, G. (2021). Applications of object detection in modular construction based on a comparative evaluation of deep learning algorithms. <i>Construction Innovation: Information, Process, Management</i> .	3,3	21	2021	8	2024	77,0
Shin, J., Moon, S., Cho, B., Hwang, S., & Choi, B. (2022). Extended technology acceptance model to explain the mechanism of modular construction adoption. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 342(Complete).	11,1	12	2022	8	2024	76,0
Garusinghe, G.D., Perera, B., & Weerapperuma, U.S. (2023). Integrating Circular Economy Principles in Modular Construction to Enhance Sustainability. <i>Sustainability</i> .	3,9	4	2023	8	2024	76,0
Turner, C., Oyekan, J., & Stergioulas, L.K. (2021). Distributed Manufacturing: A New Digital Framework for Sustainable Modular Construction. <i>Sustainability</i> .	3,9	20	2021	8	2024	76,0
Wang, J., Li, X., Han, S., & Al-Hussein, M. (2023). 3D standard motion time-based ergonomic risk analysis for workplace design in modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	3	2023	8	2024	75,0
Yusof, M.R., Nasrun, M.N., Nawi, M., & Jabar, I.L. (2023). The Absence of Smart Technology as One of The Key Factors of Transportation in Modular Construction: A Case Study in Malaysia. <i>Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology</i> .	5,6	3	2023	8	2024	75,0
Bello, A.O., Khan, A.A., Idris, A.R., & Awwal, H.M. (2023). Barriers to modular construction systems implementation in developing countries' architecture, engineering and construction industry. <i>Engineering, Construction and Architectural Management</i> .	4,1	3	2023	8	2024	75,0
Romero Quidel, G., Soto Acuña, M.J., Rojas Herrera, C.J., Rodríguez Neira, K., & Cárdenas-Ramírez, J.P. (2023). Assessment of Modular Construction System Made with Low Environmental Impact Construction Materials for Achieving Sustainable Housing Projects. <i>Sustainability</i> .	3,9	3	2023	8	2024	75,0
Zhu, A., Zhang, Z., & Pan, W. (2022). Crane-lift path planning for high-rise modular integrated construction through metaheuristic optimization and virtual prototyping. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	10	2022	8	2024	74,0
Arshad, H., & Zayed, T.M. (2022). Critical influencing factors of supply chain management for modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	10	2022	8	2024	74,0
Peiris, A., Hui, F.K., Duffield, C.F., & Ngo, T. (2023). Production scheduling in modular construction: Metaheuristics and future directions. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	2	2023	8	2024	74,0
Leong, Z., Chen, R., Xu, Z., Lin, Y., & Hu, N. (2023). Robotic arm three-dimensional printing and modular construction of a meter-scale lattice façade structure. <i>Engineering Structures</i> .	5,5	2	2023	8	2024	74,0
Li, S., Gondokusumo, G.S., Venkateshwaran, A., & Liew, J. (2023). Structural behaviour of steel fibre-reinforced concrete floor system for modular construction. <i>Engineering Structures</i> .	5,5	2	2023	8	2024	74,0
Hussein, M., Darko, A., Eltoukhy, A.E., & Zayed, T.M. (2022). Sustainable Logistics Planning in Modular Integrated Construction Using Multimethod Simulation and Taguchi Approach. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	10	2022	8	2024	74,0
Khan, A.A., Yu, R., Liu, T., Gu, N., & Walsh, J. (2023). Volumetric Modular Construction Risks: A Comprehensive Review and Digital-Technology-Coupled Circular Mitigation Strategies. <i>Sustainability</i> .	3,9	2	2023	8	2024	74,0
Gan, J., Li, K., Li, X., Mok, E., Ho, P., Law, J., Lau, J., Kwok, R., & Yau, R.M. (2023). Parametric BIM-Based Lifecycle Performance Prediction and Optimisation for Residential Buildings Using Alternative Materials and Designs. <i>Buildings</i> .	3,8	2	2023	8	2024	74,0

Teschemacher, T., & Bletzinger, K. (2023). CAD-integrated parametric modular construction design. Engineering Reports, 5.	1,8	2	2023	8	2024	74,0
Jang, J., Ahn, S., Cha, S.H., Cho, K., Koo, C., & Kim, T.W. (2020). Toward productivity in future construction: mapping knowledge and finding insights for achieving successful offsite construction projects. J. Comput. Des. Eng., 8, 1-14.	1,44	18	2021	8	2024	74,0
Lu, W., Yang, Z., & Kong, L. (2023). Identification of Learning Effects in Modular Construction Manufacturing. Automation in Construction.	10,3	1	2023	8	2024	73,0
Sullcapuma Morales, M.A. (2023). MODULAR CONSTRUCTION: A SUSTAINABLE SOLUTION FOR CARBON EMISSION REDUCTION IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology.	4,9	1	2023	8	2024	73,0
Rehman, S.U., Kim, I., & Choi, J. (2023). Data-driven integration framework for four-dimensional building information modeling simulation in modular construction: a case study approach. J. Comput. Des. Eng., 10, 2288-2311.	4,8	1	2023	8	2024	73,0
Thurairajah, N., Rathnasinghe, A.P., Ali, M., & Shashwat, S. (2023). Unexpected Challenges in the Modular Construction Implementation: Are UK Contractors Ready? Sustainability.	3,9	1	2023	8	2024	73,0
Li, J., Andersen, L.V., & Hudert, M.M. (2023). The Potential Contribution of Modular Volumetric Timber Buildings to Circular Construction: A State-of-the-Art Review Based on Literature and 60 Case Studies. Sustainability.	3,9	1	2023	8	2024	73,0
Thirunavukkarasu, K., Kanthasamy, E., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Rajanayagam, H., Suntharalingam, T., & Dissanayake, M. (2021). Sustainable Performance of a Modular Building System Made of Built-Up Cold-Formed Steel Beams. Buildings.	3,8	17	2021	8	2024	73,0
Muraj, I., Gudelj, A., Jelčić, D., & Sopta, M. (2023). Evaluation of Temporary COVID-19 Testing Sites at Brussels Airport, Belgium: Users' Comfort and Privacy. Buildings.	3,8	1	2023	8	2024	73,0
Munmulla, T., Hidallana-Gamage, H.D., Navaratnam, S., Ponnampalam, T., Zhang, G., & Jayasinghe, T. (2023). Suitability of Modular Technology for House Construction in Sri Lanka: A Survey and a Case Study. Buildings.	3,8	1	2023	8	2024	73,0
Deng, E., Lian, J., Liu, Z., Zhang, G., Wang, S., & Cao, D. (2022). Compressive Behavior of a Fully Prefabricated Liftable Connection for Modular Steel Construction. Buildings.	3,8	9	2022	8	2024	73,0
Camargos, J.S., Dias, E.A., da Silva, G.M., Nunes, V.A., & Borges, P.H. (2023). Development of sustainable foamed alkali-activated materials for modular construction. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 45.	1,8	1	2023	8	2024	73,0
Wurth, J., Stegherr, H., Heider, M., Luley, L., & Hähner, J. (2023). Fast, Flexible, and Fearless: A Rust Framework for the Modular Construction of Metaheuristics. Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation.	1	1	2023	8	2024	73,0
Chen, C. (2023). Application of modular construction method to constructing buildings: advantages and barriers. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction.	1	1	2023	8	2024	73,0
Liu, X., Zhao, J., Sun, G., Zhou, G., & Han, X. (2023). Supply chain management for modular construction using building information modeling. PCI Journal.	0,9	1	2023	8	2024	73,0
Aldabbas, L.J. (2023). Challenges of Digital Twin Technologies Integration in Modular Construction: A Case from a Manufacturer's Perspective. International Journal of Advanced Computer Science and Applications.	0,7	1	2023	8	2024	73,0
Aulia, D., Haryanto, V.M., Waseso, A.B., Prayitno, E.A., & Sampetoding, M.M. (2023). CRITICAL SUCCESS FACTORS FOR MODULAR CONSTRUCTION ON HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS BASED RISK MANAGEABILITY TO INCREASE PROJECT TIME PERFORMANCE. INDONESIAN JOURNAL OF URBAN AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY.	0,3	1	2023	8	2024	73,0
Liu, Z., Li, X., Wu, C., Ma, J., Yang, Z., & Guo, Y. (2023). Automatic work package sizing for cost-effective modular construction. Automation in Construction.	10,3	0	2023	8	2024	72,0
Lim, Y.W., Ling, P.C., Tan, C.S., Chong, H., & Thurairajah, A. (2022). Planning and coordination of modular construction. Automation in Construction.	10,3	8	2022	8	2024	72,0
Untermarzonner, F., Rath, M., & Kollegger, J. (2023). New modular construction method for multi-span concrete bridges with reduced material consumption. IABSE Congress, New Delhi 2023: Engineering for Sustainable Development.	8,6	0	2023	8	2024	72,0
Labik, O., Nahmens, I., Ikuma, L., & Harvey, C. (2023). On-Site versus In-Factory Installation of Solar-Plus-Storage in Modular Construction. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	0	2023	8	2024	72,0
Liu, H., Al-Hussein, M., Lei, Z., Li, H.X., & Han, S. (2023). Modular Construction/Off-Site Construction. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	0	2023	8	2024	72,0
Nguyen, T.D., Moon, H., & Ahn, Y.H. (2022). Critical Review of Trends in Modular Integrated Construction Research with a Focus on Sustainability. Sustainability.	3,9	8	2022	8	2024	72,0
Khodabocus, S., & Seyis, S. (2023). Multi-criteria decision-making model for risk management in modular construction projects. International Journal of Construction Management, 24, 240 - 250.	3,9	0	2023	8	2024	72,0

Jayawardana, J., Sandanayake, M.S., Kulatunga, A.K., Jayasinghe, J., Zhang, G., & Osadith, S.A. (2023). Evaluating the Circular Economy Potential of Modular Construction in Developing Economies—A Life Cycle Assessment. Sustainability.	3,9	0	2023	8	2024	72,0
Mavridou, T., Nanos, N., & Doulos, L.T. (2023). Modular Construction of Industrial Buildings and Lean Thinking—Identifying the Role of Daylight through a Case Study. Sustainability.	3,9	0	2023	8	2024	72,0
Kosbar, M.M., Elbeltagi, E., Mahdi, I., Kassem, M., & Ehab, A. (2023). Off-Site Manufacturing: Determining Decision-Making Factors. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Yang, Q., Mei, Q., Fan, C., Ma, M., & Li, X. (2023). Environment-Aware Worker Trajectory Prediction Using Surveillance Camera in Modular Construction Facilities. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Stüttgen, S., Akpanya, R., Beckmann, B., Chudoba, R., Robertz, D., & Niemeyer, A.C. (2023). Modular Construction of Topological Interlocking Blocks—An Algebraic Approach for Resource-Efficient Carbon-Reinforced Concrete Structures. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Geiger, M., Hock, D., & Nübel, K. (2023). Development of a Novel Production Model for Labour Productivity: Modular Construction Toolkit Design. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Wang, Q., Yang, D., & Chen, D. (2023). Study on the Mechanical Properties of MiC Formworks with Different Material Components. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Shin, J., & Choi, B. (2022). Design and Implementation of Quality Information Management System for Modular Construction Factory. Buildings.	3,8	8	2022	8	2024	72,0
Xiong, W., Xu, X., Chen, L., & Yang, J. (2022). Sound-Based Construction Activity Monitoring with Deep Learning. Buildings.	3,8	8	2022	8	2024	72,0
Salama, T., & Said, H. (2023). Agility assessment framework for modular and offsite construction. Construction Innovation.	3,3	0	2023	8	2024	72,0
Pralat, K., & Plis, A. (2023). Analysis of the bearing resistance of the modified bolted end-plate joints of thin-walled profiles used in modular construction. Archives of Civil Engineering.	1,1	0	2023	8	2024	72,0
Hari, A., Pillai, A.S., & Sooraj, S. (2023). Numerical investigation on bending behaviour of hollow precast slab with FRP tubes using Ansys. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1237.	1	0	2023	8	2024	72,0
Milovanović, N., Simões, R., Tankova, T., Silva, L.C., Craveiro, H., Costa, R.J., & da Silva, L. (2023). Novel Hybrid Modular Construction System - Structural Behaviour of Isolated Sub-Frames. ce/papers, 6.	1	0	2023	8	2024	72,0
Kinailiuk, M. (2023). Application of modular construction technologies in the design of hotel and hostel buildings. Current problems of architecture and urban planning.	1	0	2023	8	2024	72,0
Arowoia, V.A., & Oyefusi, O. (2022). An Analysis of the Benefits of Adopting Modular Construction: A Nigerian Construction Industry Context. Journal of Construction in Developing Countries.	0,9	0	2023	8	2024	72,0
Belyaeva, Z.V., & Polukhina, A.V. (2023). Requirements for block elements for modular construction. Russian Journal of Construction Science and Technology.	0,9	0	2023	8	2024	72,0
Su, C., Yuan, M., Fan, Y., Zhu, L., & Hu, N. (2023). Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hyper shell structure. Architectural Intelligence, 2.	0,7	0	2023	8	2024	72,0
Charkas, M., & Needham, M. (2023). How Dallas Fort Worth International Airport is using modular construction to reduce development costs and timelines. Journal of Airport Management.	0,4	0	2023	8	2024	72,0
Abdul Nabi, M., & El-adaway, I.H. (2022). Understanding Disputes in Modular Construction Projects: Key Common Causes and Their Associations. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	7	2022	8	2024	71,0
Lerche, J., Enevoldsen, P., & Seppänen, O. (2022). Application of Takt and Kanban to Modular Wind Turbine Construction. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	7	2022	8	2024	71,0
Panahi, R., Louis, J., Aziere, N., Podder, A., & Swanson, C. (2022). Identifying Modular Construction Worker Tasks Using Computer Vision. Computing in Civil Engineering 2021.	4,7	7	2022	8	2024	71,0
Altan, H., & Ozariso, B. (2022). An Analysis of the Development of Modular Building Design Elements to Improve Thermal Performance of a Representative High Rise Residential Estate in the Coastline City of Famagusta, Cyprus. Sustainability.	3,9	7	2022	8	2024	71,0
Ribeiro, A.M., Arantes, A., & Cruz, C.O. (2022). Barriers to the Adoption of Modular Construction in Portugal: An Interpretive Structural Modeling Approach. Buildings.	3,8	7	2022	8	2024	71,0
Olawumi, T.O., Chan, D.W., Ojo, S.O., & Yam, M.C. (2021). Automating the modular construction process: A review of digital technologies and future directions with blockchain technology. Journal of Building Engineering.	6,4	14	2021	8	2024	70,0
Lee, J., & Hyun, H. (2019). Multiple Modular Building Construction Project Scheduling Using Genetic Algorithms. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	30	2019	8	2024	70,0
Chatzimichailidou, M., & Ma, Y. (2022). Using BIM in the safety risk management of modular construction. Safety Science.	4,7	6	2022	8	2024	70,0

John, K., Rahman, S.K., Kafle, B., Weiss, M., Hansen, K., Elchalakani, M., Udawatta, N., Hosseini, M.R., & Al-Ameri, R. (2022). Structural Performance Assessment of Innovative Hollow Cellular Panels for Modular Flooring System. <i>Buildings</i> .	3,8	6	2022	8	2024	70,0
Torres, J., Garay-Martinez, R., Oregi, X., Torrens-Galdiz, J.I., Uriarte-Arrien, A., Pracucci, A., Casadei, O., Magnani, S., Arroyo, N., & Cea, A.M. (2021). Plug and Play Modular Façade Construction System for Renovation for Residential Buildings. <i>Buildings</i> .	3,8	14	2021	8	2024	70,0
Pervez, H., Ali, Y., Pamučar, D., Garai-Fodor, M., & Csizsárik-Kocsir, Á. (2022). Evaluation of critical risk factors in the implementation of modular construction. <i>PLoS ONE</i> , 17.	1	6	2022	8	2024	70,0
Pan, W., Yang, Y., & Pan, M. (2022). Implementing modular integrated construction in high-rise high-density cities: perspectives in Hong Kong. <i>Building Research & Information</i> , 51, 354 - 368.	3,9	5	2022	8	2024	69,0
Beulah, F. (2022). Challenges Faced in Prefabrication or Modular Construction. <i>International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology</i> .	2,29	5	2022	8	2024	69,0
Bhatia, A.P., Han, S., & Moselhi, O. (2022). A simulation-based statistical method for planning modular construction manufacturing. <i>J. Inf. Technol. Constr.</i> , 27, 130-144.	1,8	5	2022	8	2024	69,0
Ma, C., & van Amejide, J. (2022). Adaptable modular construction systems and multi-objective optimisation strategies for mass-customised housing: A new user-driven paradigm for high-rise living in Hong Kong. <i>International Journal of Architectural Computing</i> , 20, 96 - 113.	1,6	5	2022	8	2024	69,0
Feldmann, F.G. (2022). Towards Lean Automation in Construction—Exploring Barriers to Implementing Automation in Prefabrication. <i>Sustainability</i> .	10,3	4	2022	8	2024	68,0
Cao, J., Zhao, P., & Liu, G. (2022). Optimizing the production process of modular construction using an assembly line-integrated supermarket. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	4	2022	8	2024	68,0
Almashaqbeh, M., & El-Rayes, K. (2021). Optimizing the modularization of floor plans in modular construction projects. <i>Journal of Building Engineering</i> .	6,4	12	2021	8	2024	68,0
Liu, G., Huang, R., Li, K., Shrestha, A., & Fu, X. (2022). Greenhouse Gas Emissions Management in Prefabrication and Modular Construction Based on Earned Value Management. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	4	2022	8	2024	68,0
Anderson, N., Wedawatta, G., Rathnayake, I., Domingo, N., & Azizi, Z.M. (2022). Embodied Energy Consumption in the Residential Sector: A Case Study of Affordable Housing. <i>Sustainability</i> .	3,9	4	2022	8	2024	68,0
Liu, J., & Lu, M. (2018). Constraint Programming Approach to Optimizing Project Schedules under Material Logistics and Crew Availability Constraints. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	35	2018	8	2024	67,0
Zheng, Z., Li, Y., & Torres, J. (2022). An integrated method of automated layout design and optimization for modular construction. <i>Engineering, Construction and Architectural Management</i> .	4,1	3	2022	8	2024	67,0
Chen, L., Zhai, C., Wang, L., Hu, X., & Huang, X. (2022). Modular Structure Construction Progress Scenario: A Case Study of an Emergency Hospital to Address the COVID-19 Pandemic. <i>Sustainability</i> .	3,9	3	2022	8	2024	67,0
Assaf, M., Hussein, M., Alsulami, B.T., & Zayed, T.M. (2022). A Mixed Review of Cash Flow Modeling: Potential of Blockchain for Modular Construction. <i>Buildings</i> .	3,8	3	2022	8	2024	67,0
Munmulla, T., Navaratnam, S., Thamboo, J.A., Ponnampalam, T., Damruwan, H.H., Tsavdaridis, K.D., & Zang, G. (2022). Analyses of Structural Robustness of Prefabricated Modular Buildings: A Case Study on Mid-Rise Building Configurations. <i>Buildings</i> .	3,8	3	2022	8	2024	67,0
Kanthasamy, E., Hussain, J., Thirunavukkarasu, K., Poologanathan, K., Roy, K., Beulah Gnana Ananthi, G., & Suntharalingam, T. (2022). Flexural Behaviour of Built-Up Beams Made of Optimised Sections. <i>Buildings</i> .	3,8	3	2022	8	2024	67,0
Rebai, S., Hamdi, O., BuHamdan, S., Lafhaj, Z., & Yim, P. (2022). AWP for residential buildings to modular construction: A proposed framework. <i>Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings</i> .	1	3	2022	8	2024	67,0
Zhu, Q., Zhou, T., Xia, P., & Du, J. (2022). Robot Planning for Active Collision Avoidance in Modular Construction: Pipe Skids Example. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	5,1	2	2022	8	2024	66,0
Taiwo, R., Hussein, M., & Zayed, T.M. (2022). An Integrated Approach of Simulation and Regression Analysis for Assessing Productivity in Modular Integrated Construction Projects. <i>Buildings</i> .	3,8	2	2022	8	2024	66,0
Feist, S., Sanhudo, L.P., Esteves, V., Pires, M., & Costa, A.A. (2022). Semi-Supervised Clustering for Architectural Modularisation. <i>Buildings</i> .	3,8	2	2022	8	2024	66,0
Perera, D., Upasiri, I., Poologanathan, K., O'Grady, K., Nagaratnam, B., Kanthasamy, E., & Rajanayagam, H. (2022). Numerical Investigation on Fire Performance of LSF and Steel Modular Floor Panels. <i>Buildings</i> .	3,8	2	2022	8	2024	66,0
Labrecque, N., Ménard, S., Oudjene, M., & Blanchet, P. (2022). Finite Element Study of Hyperstructure Systems with Modular Light-Frame Construction in High-Rise Buildings. <i>Buildings</i> .	3,8	2	2022	8	2024	66,0
Wei, Y., Choi, H., & Lei, Z. (2021). A generative design approach for modular construction in congested urban areas. <i>Smart and Sustainable Built Environment</i> .	3,5	10	2021	8	2024	66,0
Kouhirostami, M., & Chini, A.R. (2022). Carbon emissions comparison in modular and site-built residential construction. <i>Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings</i> .	1	2	2022	8	2024	66,0

Zhang, R., & Xu, Y. (2022). The Air Quality Impact Evaluation of Modular Construction Practices in Hong Kong and Singapore. Sustainability.	3,9	1	2022	8	2024	65,0
Elsayed, M., Mutalib, A.A., & Elsayed, K. (2022). Numerical Study of Structural Performance and Wind Flow Dynamic Behavior for PPVC Steel Modular Construction (MSC) under Various Extreme Wind Loads. Buildings.	3,8	1	2022	8	2024	65,0
Shahzad, W.M., Rajakannu, G., & Ghaleloci, N.K. (2022). Potential of Modular Offsite Construction for Emergency Situations: A New Zealand Study. Buildings.	3,8	1	2022	8	2024	65,0
Lopez, R., Chong, H., & Pereira, C. (2022). Obstacles Preventing the Off-Site Prefabrication of Timber and MEP Services: Qualitative Analyses from Builders and Suppliers in Australia. Buildings.	3,8	1	2022	8	2024	65,0
Yang, Q., Mei, Q., Fan, C., Ma, M., & Li, X. (2022). Environment-aware worker trajectory prediction using surveillance camera on modular construction sites. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	1	2022	8	2024	65,0
Baroroh, I., Made Ariana, I., & Dinariyana, A. (2022). Risk Evaluation Concept of Engine Room Module Installation on Modular Construction Shipbuilding. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1081.	1	1	2022	8	2024	65,0
Ghansah, F.A., Lu, W., Chen, J., & Peng, Z. (2022). A Socio-Technical System (STS) Framework for Modular Construction of Cognitive Buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	1	2022	8	2024	65,0
Mavridou, T., Doulos, L.T., & Nanos, N. (2022). Lean Thinking into the modular construction of industrial buildings. Identifying the role of daylight. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1099.	1	1	2022	8	2024	65,0
Odo, N., & Rankin, J. (2022). Quantifying Safety in Off-site Construction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	1	2022	8	2024	65,0
Roberts, M., Allen, S., Marsh, E., Clarke, J., & Coley, D. (2022). Consequential impacts of a net-zero carbon design: life cycle assessment of an active building. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1078.	1	1	2022	8	2024	65,0
Kolugala, L.M., Pan, W., & Kumaraswamy, M.M. (2022). A dialectical system framework for adopting modular integrated construction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	1	2022	8	2024	65,0
Abdul Nabi, M., & El-adaway, I.H. (2022). A Rating Score for Assessing the Risks and Challenges Associated with Modular Construction. Construction Research Congress 2022.	1	1	2022	8	2024	65,0
Aboginije, A., Aigbavboa, C.O., & Thwala, W.D. (2021). A Holistic Assessment of Construction and Demolition Waste Management in the Nigerian Construction Projects. Sustainability.	3,9	8	2021	8	2024	64,0
Dong, C., Wang, H., Zhang, H., Zhang, M.L., Guan, J., Zhang, Z., Lin, Q., & Zuo, Z. (2022). Research on Fine Scheduling and Assembly Planning of Modular Integrated Building: A Case Study of the Baguang International Hotel Project. Buildings.	3,8	0	2022	8	2024	64,0
Zain, A., Imanpour, A., & Driver, R.G. (2022). Achieving Improved Construction Efficiency for Multi-Story Steel Concentrically Braced Frames. International Journal of Steel Structures, 22, 472 - 487.	1,5	0	2022	8	2024	64,0
Jayawardana, J., Zhang, G., Kulatunga, A.K., Sandanayake, M.S., & Jayasinghe, J. (2022). Life cycle sustainability assessment for modular construction – A proposed conceptual framework. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	0	2022	8	2024	64,0
Bau, G., & Oviedo-Haito, R.J. (2022). Mapping activities and inputs of modular construction with steel 3D modules in Brazil. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	0	2022	8	2024	64,0
Passarelli, R.N. (2022). Modular construction and circularity. A case study of a mass timber design studio. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	0	2022	8	2024	64,0
Tambichik, M.A., Sherliza, Z.S., & Abdullah, N.A. (2022). Comparative Study between Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC) and IBS 2D: A Case Study of School Extension Project in Malaysia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1022.	1	0	2022	8	2024	64,0
Razi, M.A., Kamali, M., Alam, S., & Sadiq, R. (2022). Affordable wall panels using sustainable waste materials: a review. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	0	2022	8	2024	64,0
Al-Hussein, M. (2022). Front matter, 2022 Proceedings of the Modular and Offsite Construction Summit. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	0	2022	8	2024	64,0
Mackebach, S., Zeller, J.C., & Osebold, R. (2020). A Roadmap towards Circularity - Modular Construction as a Tool for Circular Economy in the Built Environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 588.	1	16	2020	8	2024	64,0
Danusevics, M., Braslina, L., Skiltere, D., Batraga, A., & Braslins, G. (2022). Modular Construction Cost Forecasting Design to Support Continuous Construction System Improvements. Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2022) Integrating People and Intelligent Systems.	1	0	2022	8	2024	64,0
Zimman, J.S., & Yang, D. (2022). Sustainable Modular Construction Using B-CORE Stainless Steel. 2022 6th International Conference on Universal Village (UV), 1-4.	1	0	2022	8	2024	64,0
Zaalouk, A., & Han, S. (2022). Lean-Based Integrated Approach for Manual Work Design Optimization in Modular Construction. Construction Research Congress 2022.	1	0	2022	8	2024	64,0
Toktaganov, A., & Zhussupov, T. (2022). ADVANTAGES OF MODULAR CONSTRUCTION TECHNOLOGY IN THE CASE OF NUR-SULTAN. Universum:Technical sciences.	0,18	0	2022	8	2024	64,0

Zaalouk, A., & Han, S. (2021). Parameterized Design Optimization Framework for Worker-Friendly Workplaces in Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> -asce, 147, 04021030.	5,1	7	2021	8	2024	63,0
Dabirian, S., Han, S., & Lee, J. (2020). Stochastic-based noise exposure assessment in modular and off-site construction. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	11,1	14	2020	8	2024	62,0
Hořínková, D. (2021). Advantages and Disadvantages of Modular Construction, including Environmental Impacts. <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , 1203.	5	6	2021	8	2024	62,0
Giuffrida, G., Caponetto, R., Nocera, F., & Cuomo, M. (2021). Prototyping of a Novel Rammed Earth Technology. <i>Sustainability</i> .	3,9	6	2021	8	2024	62,0
Nam, S., Yoon, J., Kim, K., & Choi, B. (2020). Optimization of Prefabricated Components in Housing Modular Construction. <i>Sustainability</i> .	3,9	14	2020	8	2024	62,0
Bendi, D., Rana, M.Q., Arif, M., Lamb, S., Sawhney, A., & Kaushik, A.K. (2021). Assessing off-site readiness in construction organisations: cases from India. <i>Construction Innovation</i> .	3,3	6	2021	8	2024	62,0
Rossi, F., Arfelli, S., Hu, S., Tolio, T.A., & Freiheit, T. (2019). A systematic methodology for the modularization of manufacturing systems during early design. <i>Flexible Services and Manufacturing Journal</i> , 1-44.	2,7	22	2019	8	2024	62,0
Borodinecs, A., Geikins, A., Barone, E., Jacnevs, V., & Prozuments, A. (2021). Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct. <i>Buildings</i> .	3,8	5	2021	8	2024	61,0
Bendi, D., Rana, M.Q., Arif, M., Goulding, J.S., & Kaushik, A.K. (2020). Understanding off-site readiness in Indian construction organisations. <i>Construction Innovation: Information, Process, Management</i> .	3,3	13	2020	8	2024	61,0
Niu, S., Yang, Y., & Pan, W. (2019). Logistics Planning and Visualization of Modular Integrated Construction Projects Based on BIM-GIS Integration and Vehicle Routing Algorithm. <i>Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings</i> .	1	21	2019	8	2024	61,0
Hyun, H., Lee, Y., Kim, H., & Kim, J. (2021). Framework for Long-Term Public Housing Supply Plan Focusing on Small-Scale Offsite Construction in Seoul. <i>Sustainability</i> , 13, 5361.	3,9	4	2021	8	2024	60,0
Rashid, K.M., & Louis, J. (2020). Process Discovery and Conformance Checking in Modular Construction Using RFID and Process Mining.	1	4	2021	8	2024	60,0
Wenke, J.M., & Dolan, C.W. (2021). Structural integrity of precast concrete modular construction. <i>Pci Journal</i> , 66, 58-70.	0,9	4	2021	8	2024	60,0
Young, B.E., Seidu, R.D., Thayaparan, M., & Appiah-Kubi, J. (2020). Modular Construction Innovation in the UK: The Case of Residential Buildings.	3,8	11	2020	8	2024	59,0
Kucukvar, M., Kutty, A.A., Onat, N.C., Al Jurf, N., Al-Abdulmalek, N., Naser, A., & Ermolaeva, Y.V. (2021). How Can Collaborative Circular Economy Practices in Modular Construction Help Fédération Internationale de Football Association World Cup Qatar 2022 to Achieve Its Quest for Sustainable Development and Ecological Systems? <i>Frontiers in Sustainability</i> .	2,1	3	2021	8	2024	59,0
Tamayo, E.C., Musilek, P., Al-Hussein, M., & Qureshi, A.J. (2021). Conceptual design of controllers for automated modular construction machines. <i>Results in Engineering</i> .	6	2	2021	8	2024	58,0
Karthik, S., Kermanshachi, S., & Behzad, R. (2020). Modular Construction vs. Traditional Construction: Advantages and Limitations: A Comparative Study. <i>Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020</i> .	5	10	2020	8	2024	58,0
Salama, T., Figgess, G., Elsharawy, M., & Elsokkary, H. (2020). Financial Modeling for Modular and Offsite Construction. <i>International Journal of Engineering and Advanced Technology</i> .	5	10	2020	8	2024	58,0
Ribeiro, A., & Guimarães, C.D. (2021). Estimation of greenhouse gas emissions in civil construction for a modular construction on the campus of the Federal University of Rio de Janeiro, Brazil. <i>Journal of Physics: Conference Series</i> , 1938.	2,8	2	2021	8	2024	58,0
Sing, M.C., Chan, J., Liu, H.J., & Ngai, N.N. (2021). Developing an analytic hierarchy process-based decision model for modular construction in urban areas. <i>Journal of Engineering, Design and Technology</i> .	1,5	2	2021	8	2024	58,0
Hakim, H.L., & Endangsih, T. (2021). The application of green building concept through fabrication modular construction system in special house construction. <i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i> , 878.	1	2	2021	8	2024	58,0
da Silva, L.S., Tankova, T., Craveiro, H.D., Silva, L.C., Simões, R., & Costa, R. (2021). Innovative 3D joint for steel modular construction. <i>ce/papers</i> , 4.	1	2	2021	8	2024	58,0
Lee, D., & Lee, S. (2021). Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. <i>Applied Sciences</i> .	5,6	1	2021	8	2024	57,0
Enshassi, M.S., Walbridge, S., West, J., & Haas, C.T. (2020). Dynamic and Proactive Risk-Based Methodology for Managing Excessive Geometric Variability Issues in Modular Construction Projects Using Bayesian Theory. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> -asce, 146, 04019096.	5,1	9	2020	8	2024	57,0
Suleiman, M.A., Elshaer, A.M., Billah, M., & Bassuony, M. (2021). Propagation of Mouth-Generated Aerosols in a Modularly Constructed Hospital Room. <i>Sustainability</i> .	3,9	1	2021	8	2024	57,0
Shen, J., Copertaro, B., Zhang, X., Koke, J., Kaufmann, P., & Krause, S. (2019). Exploring the Potential of Climate-Adaptive Container Building Design under Future Climates Scenarios in Three Different Climate Zones. <i>Sustainability</i> .	3,9	17	2019	8	2024	57,0

Liu, C., Shirowzhan, S., Sepasgozar, S.M., & Kaboli, A.S. (2019). Evaluation of Classical Operators and Fuzzy Logic Algorithms for Edge Detection of Panels at Exterior Cladding of Buildings. Buildings.	3,8	17	2019	8	2024	57,0
(2021). Modular construction methods in composite bridge construction – review and current developments for bridges with small and medium spans. Steel Construction, 14.	3,8	1	2021	8	2024	57,0
Bohorquez, F.R., Esenarro, D., Rodriguez, C., Tafur, V., & Tafur, G.A. (2021). Modular construction camp as an architectural model and its different construction systems – Moquegua, Perú 2020. Materials Today: Proceedings.	3,3	1	2021	8	2024	57,0
Laovisutthichai, V., Lu, W., & Xue, F. (2021). Modular Construction: Design Considerations and Opportunities. Proceedings of the 25th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate.	1	1	2021	8	2024	57,0
Aziz, N., Ishak, M.F., Oмарdin, M.A., Zulkiple, A., & Mohamed, Y. (2021). Sales Expense Strategies for Competitive Pricing of Industrial Building System (IBS) Components. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 641.	1	0	2021	8	2024	56,0
Nurdiani, N., Katarina, W., & Putra, R.R. (2021). The application of modular architecture on apartment buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 794.	1	0	2021	8	2024	56,0
Valente, I., & Kokorelis, V. (2021). SMART BIM OBJECTS FOR INTELLIGENT MODULAR CONSTRUCTION.	1	0	2021	8	2024	56,0
Simbanegavi, P., & Ndlovu, P. (2021). Perception on Modular Construction for Low-Income Housing in South Africa. The Future of the African Real Estate Sector: What Next? The 20th Annual AfRES Conference.	1	0	2021	8	2024	56,0
Lee, J., Kim, J., Lee, H., Lee, Y., & Kim, H. (2019). Small-Scale Public Rental Housing Development Using Modular Construction—Lessons learned from Case Studies in Seoul, Korea. Sustainability.	3,9	15	2019	8	2024	55,0
Lee, J., Park, M., Lee, H., & Hyun, H. (2019). Classification of Modular Building Construction Projects Based on Schedule-Driven Approach. Journal of Construction Engineering and Management.	5,1	13	2019	8	2024	53,0
Lee, M., Lee, D., Kim, T., & Lee, U. (2020). Practical Analysis of BIM Tasks for Modular Construction Projects in South Korea. Sustainability.	3,9	5	2020	8	2024	53,0
Ovchinnikov, A., Lovchikov, A.P., Ryadnov, A.I., Fedorova, O.A., Konstantinov, M., & Fomin, S.D. (2020). On the substantiation of the technological scheme of the combine harvester with the stationary process of threshing bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 488.	1	4	2020	8	2024	52,0
Hong, W. (2020). Application to the modular construction.	1	4	2020	8	2024	52,0
Ghannad, P., Lee, Y., & Choi, J.O. (2019). Investigating Stakeholders' Perceptions of Feasibility and Implications of Modular Construction-Based Post-Disaster Reconstruction. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	10	2019	8	2024	50,0
Qin, H., & Yao, Y. (2020). The analysis of differentiation Between Prefabrication and Modular Construction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 580.	1	2	2020	8	2024	50,0
Baroroh, I., Ariana, I.M., & Dinariyana, A. (2020). Supply chain performance analysis on modular construction shipbuilding. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 557.	1	2	2020	8	2024	50,0
Rakotonjanahary, M., Silva, M.F., Scholzen, F., & Diederich-Waldmann, D. (2020). Designing of the module envelope of a hybrid modular building to meet the passive house standards in Luxembourg. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 588.	1	1	2020	8	2024	49,0
Thompson, J. (2019). Modular Construction: A Solution to Affordable Housing Challenges. Cornell Real Estate Review, 17, 21.	1	9	2019	8	2024	49,0
Fiume, F., Callegaro, N., & Albatini, R. (2020). Modular Construction for Emergency Situation: A Design Methodology for the Building Envelope.	1	1	2020	8	2024	49,0
Manjusha, M., & Althaf, M.M. (2020). Numerical analysis on flexural behaviour of GFRP sandwich roof panel with multilayer core material. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 491.	1	0	2020	8	2024	48,0
Wuni, I.Y., & Shen, G.Q. (2019). Risks Identification and Allocation in the Supply Chain of Modular Integrated Construction (MiC). Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	8	2019	8	2024	48,0
Musa, M.F., Mohammad, M.F., Mahbub, R., & Yusof, M.R. (2018). Adopting Modular Construction in the Malaysian Construction Industry. Asian Journal of Environment-Behaviour Studies.	5	15	2018	8	2024	47,0
Amer, M., Mustafa, A.M., & Attia, S. (2019). Conceptual framework for off-site roof stacking construction. Journal of Building Engineering.	6,4	6	2019	8	2024	46,0
Zhang, Z., Pan, W., & Zheng, Z. (2019). Transfer Learning Enabled Process Recognition for Module Installation of High-rise Modular Buildings. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	6	2019	8	2024	46,0
Sholanke, A.B., Opoko, P.A., Onakoya, O.A., & Adigun, T.F. (2019). Awareness Level and Adoption of Modular Construction for Affordable Housing in Nigeria: Architects' Perspective. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.	5,6	4	2019	8	2024	44,0
Abiri, B., Louis, J., & Riggio, M. (2019). Decision-making for Cross-Laminated Timber Modular Construction Logistics Using Discrete Event Simulation. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	4	2019	8	2024	44,0

Chai, T., & Tan, C.S. (2019). Review on deployable structure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 220.	1	4	2019	8	2024	44,0
Abushwereb, M., Liu, H., & Al-Hussein, M. (2019). A Knowledge-Based Approach Towards Automated Manufacturing-Centric BIM: Wood Frame Design and Modelling for Light-Frame Buildings. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	4	2019	8	2024	44,0
Carvalho, B., & Scheer, S. (2019). Lean as an Integrator of Modular Construction. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	3	2019	8	2024	43,0
Greenough, T., Smith, M., & Mariash, A. (2019). Integrating Computational Design to Improve the Design Workflow of Modular Construction. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	3	2019	8	2024	43,0
Sharafi, P., Nemati, S., Samali, B., & Ghodrat, M. (2018). Development of an Innovative Modular Foam-Filled Panelized System for Rapidly Assembled Postdisaster Housing. Buildings.	3,8	10	2018	8	2024	42,0
Leindecker, H.C., & Kugfarth, D.R. (2019). Mobile Tiny Houses – Sustainable and Affordable? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 323.	1	2	2019	8	2024	42,0
Dorrah, D.H., & El-Diraby, T.E. (2019). Mass Timber in High-Rise Buildings: Modular Design and Construction; Permitting and Contracting Issues. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	2	2019	8	2024	42,0
Aziz, S., Che Mohd Nasir, S.N., Hatrom, R., Ahmad Bazuli, L., & Abdullah, M.R. (2019). Modular Construction System (MCS) in Malaysia: Mass Customization Through Combinatorial. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 385.	1	1	2019	8	2024	41,0
Sheine, J., Donofrio, M., & Gershfeld, M. (2019). Mass Timber Modular Construction: Developments in Oregon. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	1	2019	8	2024	41,0
Wang, Y., Xia, J., Xu, B., & Ma, R. (2019). Research on the design and mechanical properties of new modular building joints. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 358.	1	1	2019	8	2024	41,0

Anexo B - MÉTODO ORDINÁIO

Design for Manufacture and Assembly						
Articles on technology transfer model (autor, year, journal)	Impact factor (phase 6)	Citations (phase 6)	Year (phase 6)	ALFA	ANO ATUAL	InOrdinatio (phase 7)
Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. <i>Automation in Construction</i> , 88, 13-22.	10,3	174	2018	8	2024	206,0
Gbadamosi, A., Mahamadu, A., Oyedele, L.O., Akinadé, O.O., Manu, P., Mahdjoubi, L., & Aigbavboa, C.O. (2019). Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	9,7	93	2019	8	2024	133,0
Gao, S., Jin, R., & Lu, W. (2019). Design for manufacture and assembly in construction: a review. <i>Building Research & Information</i> , 48, 538 - 550.	3,9	90	2019	8	2024	130,0
Rahimian, F.P., Chavdarova, V., Oliver, S., & Chamo, F. (2019). OpenBIM-Tango integrated virtual showroom for offsite manufactured production of self-build housing. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	71	2019	8	2024	111,0
Alfaify, A., Saleh, M., Abdullah, F.M., & Al-Ahmari, A.M. (2020). Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. <i>Sustainability</i> .	3,9	61	2020	8	2024	109,0
Bakhshi, S., Chenaghlo, M.R., Pour Rahimian, F., Edwards, D.J., & Dawood, N. (2022). Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	34	2022	8	2024	98,0
Wasim, M., Vaz Serra, P., & Ngo, T.D. (2020). Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review. <i>International Journal of Construction Management</i> , 22, 3014 - 3022.	3,9	50	2020	8	2024	98,0
Gao, S., Low, S.P., & Nair, K. (2018). Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore. <i>Architectural Engineering and Design Management</i> , 14, 440 - 456.	2,9	65	2018	8	2024	97,0
Lu, W., Tan, T., Xu, J., Wang, J., Chen, K., Gao, S., & Xue, F. (2020). Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new. <i>Architectural Engineering and Design Management</i> , 17, 77 - 91.	2,9	47	2020	8	2024	95,0
Alwisy, A., Bu Hamdan, S., Barkokébas, B., Bouferguene, A., & Al-Hussein, M. (2019). A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 187 - 205.	3,9	53	2019	8	2024	93,0
Wasim, M., Han, T.M., Huang, H., Madiyev, M., & Ngo, T.D. (2020). An approach for sustainable, cost-effective and optimised material design for the prefabricated non-structural components of residential buildings. <i>Journal of building engineering</i> , 32, 101474.	6,7	44	2020	8	2024	92,0
Formentini, G., Boix Rodríguez, N., & Favi, C. (2022). Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review. <i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> , 120, 4307 - 4334.	2,9	25	2022	8	2024	89,0
Gbadamosi, A., Oyedele, L.O., Mahamadu, A., Kusimo, H., Bilal, M., Delgado, J.M., & Muhammed-yakubu, N. (2020). Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction. <i>Automation in Construction</i> , 120, 103388.	10,3	39	2020	8	2024	87,0
Roxas, C.L., Bautista, C.R., Dela Cruz, O.G., Dela Cruz, R.L., de Pedro, J.P., Dungca, J., Lejano, B.A., & Ongpeng, J.M. (2023). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) and Design for Deconstruction (DfD) in the Construction Industry: Challenges, Trends and Developments. <i>Buildings</i> .	3,8	11	2023	8	2024	83,0
Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2022). Design for Adaptability (DfA)—Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings. <i>Applied System Innovation</i> .	3,8	18	2022	8	2024	82,0
Cheng, Z., Tang, S., Liu, H., & Lei, Z. (2023). Digital Technologies in Offsite and Prefabricated Construction: Theories and Applications. <i>Buildings</i> .	3,8	10	2023	8	2024	82,0
Du, J., Zhang, J., Castro-Lacouture, D., & Hu, Y. (2023). Lean manufacturing applications in prefabricated construction projects. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	9	2023	8	2024	81,0
Li, Z., & Tsavdaridis, K.D. (2023). Design for Seismic Resilient Cross Laminated Timber (CLT) Structures: A Review of Research, Novel Connections, Challenges and Opportunities. <i>Buildings</i> .	3,8	9	2023	8	2024	81,0
Tan, T., Lu, W., Tan, G., Xue, F., Chen, K., Xu, J., Wang, J., & Gao, S. (2020). Construction-Oriented Design for Manufacture and Assembly Guidelines. <i>Journal of Construction Engineering and Management-asce</i> , 146, 04020085.	4,1	32	2020	8	2024	80,0
Tuvayanond, W., & Prasittisopin, L. (2023). Design for Manufacture and Assembly of Digital Fabrication and Additive Manufacturing in Construction: A Review. <i>Buildings</i> .	3,8	6	2023	8	2024	78,0
Alfieri, E., Seghezzi, E., Sauchelli, M., Di Giuda, G.M., & Masera, G. (2020). A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. <i>Architectural Engineering and Design Management</i> , 16, 247 - 269.	2,9	30	2020	8	2024	78,0

Langston, C., & Zhang, W. (2021). DfMA: Towards an Integrated Strategy for a More Productive and Sustainable Construction Industry in Australia. Sustainability.	3,9	21	2021	8	2024	77,0
Garusinghe, G.D., Perera, B., & Weerapperuma, U.S. (2023). Integrating Circular Economy Principles in Modular Construction to Enhance Sustainability. Sustainability.	3,9	5	2023	8	2024	77,0
Bao, Z., Laovisutthichai, V., Tan, T., Wang, Q., & Lu, W. (2021). Design for manufacture and assembly (DfMA) enablers for offsite interior design and construction. Building Research & Information, 50, 325 - 338.	3,9	27	2020	8	2024	75,0
Romero Quidel, G., Soto Acuña, M.J., Rojas Herrera, C.J., Rodríguez Neira, K., & Cárdenas-Ramírez, J.P. (2023). Assessment of Modular Construction System Made with Low Environmental Impact Construction Materials for Achieving Sustainable Housing Projects. Sustainability.	3,9	3	2023	8	2024	75,0
Qi, B., & Costin, A.M. (2023). BIM and Ontology-Based DfMA Framework for Prefabricated Component. Buildings.	3,8	3	2023	8	2024	75,0
Volpe, S., Sangiorgio, V., Petrella, A., Coppola, A., Notarnicola, M., & Fiorito, F. (2021). Building Envelope Prefabricated with 3D Printing Technology. Sustainability.	3,9	18	2021	8	2024	74,0
Dong, D., Zou, Y., Pan, H., Zhou, G., Feng, Y., & Tang, Y. (2023). DFMA-oriented modular and parametric design and secondary splitting of vertical PC components. Scientific Reports, 13.	3,8	2	2023	8	2024	74,0
Vakaj, E., Cheung, F., Cao, J., Tawil, A.H., & Patlakas, P. (2023). An Ontology-Based Cost Estimation for Offsite Construction. J. Inf. Technol. Constr., 28, 220-245.	3,6	2	2023	8	2024	74,0
Noveldi, A., Ashari, F., Pratama, R.C., & Bojonegoro, U. (2023). Design of Ergonomic Adjustable Welding Work Facilities Using the DFMA Method. Journal of Information System, Technology and Engineering.	1,16	2	2023	8	2024	74,0
Li, J., Andersen, L.V., & Hudert, M.M. (2023). The Potential Contribution of Modular Volumetric Timber Buildings to Circular Construction: A State-of-the-Art Review Based on Literature and 60 Case Studies. Sustainability.	3,9	1	2023	8	2024	73,0
Abd Razak, M.I., Khoiry, M.A., Wan Badaruzzaman, W.H., & Hussain, A.H. (2022). DfMA for a Better Industrialised Building System. Buildings.	3,8	9	2022	8	2024	73,0
Rankohi, S., Bourgault, M., Iordanova, I., & Carbone, C. (2023). Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework. Buildings.	3,8	1	2023	8	2024	73,0
Assaf, M., Hussein, M., Abdelkhalek, S., & Zayed, T.M. (2023). A Multi-Criteria Decision-Making Model for Selecting the Best Project Delivery Systems for Offsite Construction Projects. Buildings.	3,8	1	2023	8	2024	73,0
Rojas Wettling, C., Mourgues Alvarez, C., & Guindos Bretones, P. (2023). IDM for the Conceptual Evaluation Process of Industrialized Timber Projects. Advances in Civil Engineering.	1,5	1	2023	8	2024	73,0
Hong, S.M., Kim, G., Gu, H., Kim, T., & Choo, S. (2023). Development of Building Component Combination Algorithms for Generative Design-based DfMA Applications. eCAADe proceedings.	1	1	2023	8	2024	73,0
Abd Razak, M.I., Khoiry, M.A., Wan Badaruzzaman, W.H., Hussain, A.H., & Mohd Zain, M.Z. (2023). Development of Application Framework for Design for Manufacturing and Assembly Towards Digital and Sustainable Construction in Malaysia. Jurnal Kejuruteraan.	0,6	1	2023	8	2024	73,0
Alqodri, M.R., & Sirait, G. (2023). PERANCANGAN JIG PROSES DRILLING DI PT. DUO WORK ENGINEERING. Computer and Science Industrial Engineering (COMASIE).	6,7	0	2023	8	2024	72,0
Siswanto, A.A., & Arista, A. (2023). PERANCANGAN ALAT BANTU KERJA PADA PROSES PAINTING BOF NONFLIP DI PT XYZ. Computer and Science Industrial Engineering (COMASIE).	6,7	0	2023	8	2024	72,0
Abrishami, S., & Martín-Durán, R. (2021). BIM and DfMA: A Paradigm of New Opportunities. Sustainability.	3,9	16	2021	8	2024	72,0
Suwandi, A., Rachmawanto, M.P., Libyawati, W., & Siregar, J.P. (2023). The Development of Exhaust Fan Housing With Ceiling Mounting For High Rise Buildings by Using DFMA. Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS).	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Stüttgen, S., Akpanya, R., Beckmann, B., Chudoba, R., Robertz, D., & Niemeyer, A.C. (2023). Modular Construction of Topological Interlocking Blocks—An Algebraic Approach for Resource-Efficient Carbon-Reinforced Concrete Structures. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Zhai, Y., Sun, Y., Li, Y., & Tang, S. (2023). Design for Assembly (DFA) Evaluation Method for Prefabricated Buildings. Buildings.	3,8	0	2023	8	2024	72,0
Tan, T., Muns, G.K., Papadomkotiaki, E., Li, B., & Huang, J. (2022). Digital-enabled Design for manufacture and Assembly (DfMA) in offsite construction: A modularity perspective for the product and process integration. Architectural Engineering and Design Management, 18, 267-282.	2,9	8	2022	8	2024	72,0
Monetti, F., & Maffei, A. (2023). Towards the definition of assembly-oriented modular product architectures: a systematic review. Research in Engineering Design.	2,3	0	2023	8	2024	72,0

Wethasinghe, K.K., & Wong, P.S. (2023). Towards developing partnership models for leveraging design for manufacture and assembly (DfMA) for school buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law. 136, 1-10.	1,8	0	2023	8	2024	72,0
Giri, A.S., Irwin, D., Towey, D.A., Zhang, Y., Li, B., Sun, L., Wang, Z., Yu, W., Zhang, K., & Zheng, Y. (2023). Effects of Augmented Reality Gamification on Students' Intrinsic Motivation and Performance. 2023 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICET). 1-6.	1	0	2023	8	2024	72,0
Yang, S., & Zhu, J. (2023). Research on steel structure system of assembled building and its mechanical performance analysis. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 0.	1	0	2023	8	2024	72,0
Pudi, V., Bahubalendurni, M.R., & Desai, A. (2023). Carbon foot print analysis integration with DFMA concept: A case study. .	1	0	2023	8	2024	72,0
Hennessey, M.P., Freckleton, J.E., & Walter, W. (2023). ON CLARIFYING THE DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY (DFMA) QUESTIONS. Proceeding of Flexible Automation and Integrated Manufacturing 1998.	1	0	2023	8	2024	72,0
Esmacili, N.T., Vafamehr, M., Rezaei, H., & Khaki, A. (2023). A n Integrated Model of Lean Construction and Off-Site Construction for Industrialization Architecture: Review and Future Directions.	1	0	2023	8	2024	72,0
Ramuraciman Batara Sudo, A., Fiqri Vignawan Bataraipud, A., & Ansoni, A. (2023). Efficient Development of Applied Technology Innovation Through Design For Manufacture and Assembly. International Journal of Science, Technology & Management.	0,7	0	2023	8	2024	72,0
Su, C., Yuan, M., Fan, Y., Zhu, L., & Hu, N. (2023). Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hyper shell structure. Architectural Intelligence, 2.	0,65	0	2023	8	2024	72,0
Li, Y., Yu, B., Fingrut, A., & Li, J. (2023). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) of Standardized Modular Wood Components. Technology/Architecture + Design, 7, 282 - 292.	0,6	0	2023	8	2024	72,0
Shahhoseini, A., Heydari, S., & Pedrammehr, S. (2023). Manufacturing and Assembly for the Ease of Product Recycling: A Review. Designs.	0,5	0	2023	8	2024	72,0
Tan, T., Mills, G.K., Hu, J., & Papadomikolaki, E. (2021). Integrated Approaches to Design for Manufacture and Assembly: A Case Study of Huoshenshan Hospital to Combat COVID-19 in Wuhan, China. Journal of Management in Engineering, 37, 06031007.	5,3	15	2021	8	2024	71,0
Shin, J., & Choi, B. (2022). Design and Implementation of Quality Information Management System for Modular Construction Factory. Buildings.	3,8	7	2022	8	2024	71,0
Torres, J., Garay-Marquez, K., Oregi, A., Torrens-Galdiz, J.I., Oriarte-Arrien, A., Praducci, A., Casader, O., Magnani, S., Arroyo, N., & Cea, A.M. (2021). Plug and Play Modular Façade Construction System for Renovation for Residential Buildings. Buildings.	3,8	14	2021	8	2024	70,0
Taiwo, R., Hussein, M., & Zayed, T.M. (2022). An Integrated Approach of Simulation and Regression Analysis for Assessing Productivity in Modular Integrated Construction Projects. Buildings.	3,8	6	2022	8	2024	70,0
Chen, H., & Ying, K. (2022). Artificial Intelligence in the Construction Industry: Main Development Trajectories and Future Outlook. Applied Sciences.	2,7	6	2022	8	2024	70,0
Wasim, M., & Oliveira, O. (2022). Efficient design of a prefabricated steel structure integrating design for manufacture and assembly concepts. Australian Journal of Structural Engineering, 23, 356 - 369.	0,9	6	2022	8	2024	70,0
Wasim, M., & Oliveira, O. (2022). Efficient design of a prefabricated steel structure integrating design for manufacture and assembly concepts. Australian Journal of Structural Engineering, 23, 356 - 369.	0,9	6	2022	8	2024	70,0
Juniani, A.I., Singgih, M.L., & Karningsih, P.D. (2022). Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability: An Integrated Framework for Product Redesign and Innovation. Designs.	0,5	6	2022	8	2024	70,0
Hyun, H., Kim, H., & Kim, J. (2022). Integrated Off-Site Construction Design Process including DfMA Considerations. Sustainability.	3,9	5	2022	8	2024	69,0
Jung, S., & Yu, J. (2022). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) Checklists for Off-Site Construction (OSC) Projects. Sustainability.	3,9	5	2022	8	2024	69,0
Picard, L., Blanchet, P., & Bégin-Drolet, A. (2022). Assembly Solution for Modular Buildings: Development of an Automated Connecting Device for Light-Framed Structures. Buildings.	3,8	5	2022	8	2024	69,0
Santana-Sosa, A., & Kovacic, I. (2022). Barriers, Opportunities and Recommendations to Enhance the Adoption of Timber within Multi-Storey Buildings in Austria. Buildings.	3,8	5	2022	8	2024	69,0
Laovisutthichai, V., & Lu, W. (2022). Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework. Smart and Sustainable Built Environment.	3,6	5	2022	8	2024	69,0
Rosarius, A., & García de Soto, B. (2021). On-site factories to support lean principles and industrialized construction. Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal, 13, 2353 - 2366.	3,1	13	2021	8	2024	69,0
Chen, K., & Lu, W. (2018). Design for Manufacture and Assembly Oriented Design Approach to a Curtain Wall System: A Case Study of a Commercial Building in Wuhan, China. Sustainability.	3,9	36	2018	8	2024	68,0
Zhang, K., & Tsai, J. (2021). Identification of Critical Factors Influencing Prefabricated Construction Quality and Their Mutual Relationship. Sustainability.	3,9	12	2021	8	2024	68,0

Sun, Z., Mei, H., Pan, W., Zhang, Z., & Shan, J. (2022). A Robotic Arm Based Design Method for Modular Building in Cold Region. Sustainability.	3,9	4	2022	8	2024	68,0
Julien, E., Blanchet, P., & Gosselin, L. (2022). Case-Study: Fully Prefabricated Wood Wall Connection to Improve Building Envelope and On-Site Efficiency. Buildings.	3,8	4	2022	8	2024	68,0
Gharaibeh, L., Matarneh, S.T., Eriksson, K., & Lantz, B. (2022). An Empirical Analysis of Barriers to Building Information Modelling (BIM) Implementation in Wood Construction Projects: Evidence from the Swedish Context. Buildings.	3,8	4	2022	8	2024	68,0
Campi, F., Favi, C., Germani, M., & Mandolini, M. (2021). CAD-integrated design for manufacturing and assembly in mechanical design. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 35, 282 - 325.	3,7	12	2021	8	2024	68,0
Rankohi, S., Carbone, C., Iordanova, I., & Bourgault, M. (2022). Design-for-Manufacturing-and-Assembly (DfMA) for the construction industry: A review. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	3	4	2022	8	2024	68,0
Wrigley, P.A., Wood, P., O'Neill, S., Hall, R., & Robertson, D. (2021). Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review. Progress in Nuclear Energy, 134, 103664	2,7	12	2021	8	2024	68,0
Vaz-Serra, P., Wasim, M., & Egglestone, S. (2021). Design for manufacture and assembly: a case study for a prefabricated bathroom wet wall panel. Journal of building engineering, 102849.	6,7	11	2021	8	2024	67,0
Chen, L., Zhai, C., Wang, L., Hu, X., & Huang, X. (2022). Modular Structure Construction Progress Scenario: A Case Study of an Emergency Hospital to Address the COVID-19 Pandemic. Sustainability.	3,9	3	2022	8	2024	67,0
Commermann, C., Hasenauer, S., Thevenin, S., Dorigu, A., & Daub, K. (2022). A skin- and feature-based approach to planning process monitoring in assembly planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 122, 3645 - 3670.	2,9	3	2022	8	2024	67,0
García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda, P. (2022). Development of Variable Residential Buildings with 3D-Printed Walls. Buildings.	3,8	2	2022	8	2024	66,0
Singgih, M.L., Ahadian, D., Puspitasari, W., Anindita, F., Ayudinda4, Aidil5, A., Pranastya6, A.L., Gamboa7, P., Fajar, A., Rosyidiin8, & Prasetyo9, H. (2022). Recent Development and Future Research of Manufacturing Excellence: A Literature Review.	1	2	2022	8	2024	66,0
Kim, I., Kim, J., Lee, A., & Choi, J. (2022). A Study on Building Online Platform for Production of DfMA-based Modular Detached House Design Customized to Client's Requirements. Korean Journal of Computational Design and Engineering.	4,8	1	2022	8	2024	65,0
Belhadj, I., Hammadi, M., & Aifaoui, N. (2021). Parallel disassembly approach with recycling rate calculation of industrial products. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113, 2969 - 2984.	2,9	9	2021	8	2024	65,0
Balqis, I.Z., Rusindiyanto, R., & Widjajati, E.P. (2022). Redesign of water filter using design for manufacturing and assembly to minimize cost and time. International Journal of Industrial Optimization.	1,18	1	2022	8	2024	65,0
Kolugala, L.M., Pan, W., & Kumaraswamy, M.M. (2022). A dialectical system framework for adopting modular integrated construction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1101.	1	1	2022	8	2024	65,0
Nguyen, D., & Shim, C. (2022). Design for Manufacturing and Assembly-Oriented Parametric Modelling of Prefabricated Bridges. IABSE Symposium, Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures.	4,4	0	2022	8	2024	64,0
Kirschke, P., & Sietko, D. (2021). The Function and Potential of Innovative Reinforced Concrete Prefabrication Technologies in Achieving Residential Construction Goals in Germany and Poland. Buildings.	3,8	8	2021	8	2024	64,0
Mesa, J.A., Esparragoza, I.E., & Maury, H. (2020). Modular architecture principles – MAPs: a key factor in the development of sustainable open architecture products. International Journal of Sustainable Engineering, 13, 108 - 122.	3,6	16	2020	8	2024	64,0
Thajudeen, S., Elgh, F., & Lennartsson, M. (2022). Applying a DFMA Approach in the Redesign of Steel Bracket -a Case Study in Post and Beam System. Proc. 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC).	1	0	2022	8	2024	64,0
Rankohi, S., Bourgault, M., Iordanova, I., & Carbone, & C. (2022). Towards Integrated Implementation of IPD and DFMA for Construction Projects: A Review. Proc. 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC).	1	0	2022	8	2024	64,0
Priavolou, C., Tsiouris, N., Niaros, V., & Kostakis, V. (2021). Towards Sustainable Construction Practices: How to Reininvigate Vernacular Buildings in the Digital Era? Buildings.	3,8	6	2021	8	2024	62,0
Mesa, J.A., Maury, H., Ameta, K., Correia, L., & Bus, J. (2018). A novel approach to include sustainability concepts in classical DFMA methods for product design. Research in Engineering Design, 29, 227-244.	2,3	29	2018	8	2024	61,0
Yohanes, Y., & Idris, M. (2021). Biomass Stove Design Based Quality Function Deployment (QFD) and Design For Manufacture And Assembly (DFMA). The Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace -science and engineering- (JOMAs).	13	3	2021	8	2024	59,0
Khan, S.U., Almutairi, Z.A., & Alanazi, M.D. (2021). Techno-Economic Assessment of Fuel Cycle Facility of System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART). Sustainability.	3,9	3	2021	8	2024	59,0
Subbaiah, A., & Antony, K.M. (2021). Integration of DFMA and sustainability - A case study. International Journal of Sustainable Engineering, 14, 343 - 356.	3,9	3	2021	8	2024	59,0

Scrimieri, D., Afazov, S.M., & Ratchev, S.M. (2021). Design of a self-learning multi-agent framework for the adaptation of modular production systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115, 1745 - 1761.	2,9	3	2021	8	2024	59,0
Favi, C., Mandolini, M., Campi, F., Cicconi, P., Raffaelli, R., & Germani, M. (2021). Design for Manufacturing and Assembly: A Method for Rules Classification. Lecture Notes in Mechanical Engineering.	1	3	2021	8	2024	59,0
Tan, T., Papadonikolaki, E., Mills, G.R., Chen, K., Zhang, Z., & Chen, K. (2021). BIM-enabled Sustainability Assessment of Design for Manufacture and Assembly. Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC).	3,9	2	2021	8	2024	58,0
Ghasemi Poor Sabet, P., & Chong, H. (2020). Pathways for the Improvement of Construction Productivity: A Perspective on the Adoption of Advanced Techniques. Advances in Civil Engineering, 2020, 1-17.	1,5	10	2020	8	2024	58,0
Zamani, E., & Dounas, T. (2021). A generative design case study for UAV-based assembly and fabrication: parametric analysis and synthesis of Iranian-Islamic Muqarnas. Open House International.	1	2	2021	8	2024	58,0
Effendi, M.S., Shayfull, Z., Radhwan, H., Ahmad, I., Ahmad, S.A., Irazman, H.N., Faudzi, S.M., Farizad, H.F., & Mohammad, N.B. (2021). Sustainability analysis and integration with DFMA and FEA: A case study of radio design.	3,9	1	2021	8	2024	57,0
Budi Kurniawan, P., & Subekti, S. (2021). REDESIGN CUTTING MACHINEMELALUI METODE PENDEKATAN DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY (DFMA). POROS.	1	1	2021	8	2024	57,0
Doellken, M., Nixdorf, B., & Matthiesen, S. (2021). Sustainability Analysing and Comparing Tool in Design for Manufacturing.	3,9	0	2021	8	2024	56,0
Chenaghlou, M.R. (2021). Integrated BIM and DfMA Parametric and Algorithmic Design Based Collaboration 1 Framework for Supporting Client Engagement within Offsite Construction 2.	1	0	2021	8	2024	56,0
Salih, A., Kenyon, J., Steele, J.P., & Weeraratne, R. (2021). Darlington Upgrade Project – Bridge design for manufacture and assembly.	1	0	2021	8	2024	56,0
Colella, W.G. (2021). Proton-conducting Ceramic Fuel Cells for Co-Producing Electricity and Fuel – A Design for Manufacture and Assembly (DFMA) Analysis. ECS Meeting Abstracts.	1	0	2021	8	2024	56,0
Effendi, M.S., Shayfull, Z., Radhwan, H., Ahmad, S.A., Roslim, N.A., Faiz, M.A., Ashraf, M.A., & Masri, H.A. (2021). DFMA and sustainable design analysis: Optimisation of RC helicopter controller. PROCEEDINGS OF 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS ENGINEERING & TECHNOLOGY (ICAMET 2020).	1	0	2021	8	2024	56,0
Effendi, M.S., Shayfull, Z., Radhwan, H., Harun, N.H., Ahmad, S.A., Norli, K., Saini, N.A., Mazlan, N.', & Omar, N.F. (2021). The utilisation of DFMA and FEA method towards sustainable design improvement: A case study of air freshener.	1	0	2021	8	2024	56,0
Effendi, M.S., Shayfull, Z., Radhwan, H., Ahmad, S.A., Musini, M.M., Sharimuddin, M.A., Kmrudzaki, K.P., & Norid, N.B. (2021). The improvement of assembly process and environmental impact using the integration of DFMA and sustainable design methodology. Construction for digital. PROCEEDINGS OF 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS ENGINEERING & TECHNOLOGY (ICAMET 2020).	1	0	2021	8	2024	56,0
Antony, K.M., & Arunkumar, S. (2020). DFMA and Sustainability Analysis in Product Design. Journal of Physics: Conference Series, 1455.	4,8	7	2020	8	2024	55,0
Lee, J., Kim, J., Lee, H., Lee, Y., & Kim, H. (2019). Small-Scale Public Rental Housing Development Using Modular Construction—Lessons learned from Case Studies in Seoul, Korea. Sustainability.	3,9	15	2019	8	2024	55,0
Ferreira, C.V., Biesek, P.L., & Scaife, K.K. (2019). Product innovation management model based on manufacturing readiness level (MRL), design for manufacturing and assembly (DFMA) and technology readiness level (TRL). Journal of the Brazilian Society of Mechanical Engineering, 42.	1,8	15	2019	8	2024	55,0
Tan, T., Lu, W., Tan, G., Xue, F., Chen, K., Xu, J., Wang, J., & Gao, S. (2020). Construction-Oriented Design for Manufacture and Assembly (DfMA) 1 Guidelines 2.	1	5	2020	8	2024	53,0
Mohammad, N.N., Rosli, M.F., Fadzly, M.K., Syaaidah, N., Salikan, M., & Effendi, M.S. (2020). Design for Manufacturing and Assembly (DFMA): Redesign of Joystick. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 864.	1	5	2020	8	2024	53,0
Fatima, S.B., Effendi, M.S., & Rosli, M.F. (2018). An integration between sustainability and design for manufacturing and assembly (DFMA) analysis for angle grinder.	3,9	20	2018	8	2024	52,0
Effendi, M.S., & Tan, D.M. (2019). Toward Lean Management for Digital Fabrication: A Review of the Shared Practices of Lean, DFMA and DfMA. Proceedings of the International Conference on Construction (ICIC).	1	11	2019	8	2024	51,0
Tan, T., Mills, G.R., Papadonikolaki, E., Lu, W., & Chen, K. (2020). BIM-enabled Design for Manufacture and Assembly.	1	3	2020	8	2024	51,0
Fatima, S.B., Effendi, M.S., & Rosli, M.F. (2018). Design for manufacturing and assembly: A review on integration with design sustainability.	3,9	18	2018	8	2024	50,0
Safaa, Y. P., Hatmoko, J. U., & Purwanggono, B. (2019).Evaluation of the use of prefabricated bridge elements with Design for Manufacture and Assembly (DfMA) criteria. MATEC Conference Network.	1	10	2019	8	2024	50,0

Nazareth, A.P. (2019). How close is the built environment to achieving circularity? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225.	1	10	2019	8	2024	50,0
Tan, T., Lu, W., Li, C., Chen, K., & Tan, G. (2020). Implementation of Design for Manufacture and Assembly (DfMA) Principles in Construction: A Case Study. Construction Research Congress 2020.	1	1	2020	8	2024	49,0
Yunus, N., & Susilawati, A. (2020). Innovation of Elbow Fixture Welding Process Based on Design for Manufacture and Assembly (DFMA).	1	1	2020	8	2024	49,0
Chowdhury, B.V., Richards, M.A., & Gokool, T. (2019). An integrated approach for sustainable product design: concurrent application of DFMA, DFE and CAD/CAE principles and tools. Latin American J. of Management for Sustainable Development.	0,8	9	2019	8	2024	49,0
Chang, T.W., Huang, H., & Datta, S. (2019). Design and Fabrication of a Responsive Carrier Component Envelope. Buildings.	3,8	8	2019	8	2024	48,0
Safaa, Y.P., Hatmoko, J.U., & Purwanggono, B. (2019). Evaluation of the use of prefabricated bridge elements with Design for Manufacture and Assembly (DfMA) criteria. MATEC Web of Conferences.	1	8	2019	8	2024	48,0
Lu, W., Tan, T., Xu, J., Wang, J., Chen, K., Gao, S., & Xue, F. (2020). Design for Manufacture and Assembly (DfMA) in construction : the old and 1 the new 2.	1	0	2020	8	2024	48,0
Kuzmanovska, I. (2020). Building Design for Manufacture and Assembly (BDfMA): Reframing the Design-Production Relationship in Industrialised Construction.	1	0	2020	8	2024	48,0
(2020). CONSTRUCTION ENGINEERING MASTERS DISSERTATION ABSTRACT People Factors Influencing DfMA Design Integration; A Product or Service?	1	0	2020	8	2024	48,0
Azizbawani, M., Damesijoo, K., & Samarkizani, S. (2020). Investigating the Impact of the Prefabrication Concept on the Design and Selection of Building Components, Case Study: Peripheral Walls in Mass Housing Projects. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering 27, 40-52.	0,8	0	2020	8	2024	48,0
Cao, Y., Liu, T., Yang, J., & Yan, H. (2018). A novel tolerance analysis method for three-dimensional assembly. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 233, 1818 - 1827.	2,6	15	2018	8	2024	47,0
Orlowski, K., Shanaka, K., & Mendis, P. (2018). Manufacturing, Modeling, Implementation and Evaluation of a Weatherproof Seal for Prefabricated Construction. Buildings.	3,8	12	2018	8	2024	44,0
Banks, C., Kotecna, K., Curtis, J., Dee, C.L., Pitt, N., & Papworth, K. (2018). Enhancing mid-rise residential construction through design for manufacture and assembly – a UK case study. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Design and Economics.	1,8	12	2018	8	2024	44,0
Gupta, M., & Kumar, S. (2019). Design Efficiency Analysis Towards Product Improvement Using DFMA. 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 1-6.	1	3	2019	8	2024	43,0
Arashpour, M. (2019). Design for manufacture and assembly in offsite construction and relationship with concurrent engineering. Offsite Production and Manufacturing for Innovative Construction.	1	3	2019	8	2024	43,0
Sharafi, P., Nemat, S., Samali, B., & Ghodrat, M. (2018). Development of an Innovative Modular Foam-Filled Panelized System for Rapidly Assembled Postdisaster Housing. Buildings.	3,8	10	2018	8	2024	42,0
Mäntyjärvi, K., Iso-Junno, T., Niemi, H., & Mälikangas, J. (2018). Design for Additive Manufacturing in Extended DFMA Process. Key Engineering Materials, 786, 342 - 347.	3,4	10	2018	8	2024	42,0
Salim, M.S., Lajis, M.A., Ros, Z.C., Nawawi, A., Shamsudin, S.B., & Yusuf, N.K. (2019). Redesigning of Agarwood Extracting Machine Applying DFMA Principle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 637.	1	2	2019	8	2024	42,0
Arashpour, M., Imtiaz, S., Williams, N., & Tang, T. (2018). Design for manufacture and assembly in On-Site Construction. Advanced Production of Modular Façade Systems. Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC).	1	9	2018	8	2024	41,0
Kuzmanovska, I., & Aitchison, M.H. (2019). DfMA in Building Design and Construction: Uses and Abuses.	1	1	2019	8	2024	41,0
Neve, O. (2019). Modular CLT – Time to swallow the offsite pill. IABSE Congress, New York, New York 2019: The Evolving Metropolis.	1	1	2019	8	2024	41,0

Uysal, M., Taşdemir, Ç., Haviarova, E., & Gazo, R. (2019). Manufacturing feasibility analysis and load carrying capacity of computer numerical control cut joints with interlocking assembly feature. BioResources.	9,7	0	2019	8	2024	40,0
matthews, S., Leminen, V., Eskmenli, H., Togniani, A., & Varis, J. (2018). Formulation of novel DFMA rules for the advancement of ergonomic factors in non-linear iterative prototype assembly. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31, 777-794.	3,7	8	2018	8	2024	40,0
Shete, T., & Tjprc (2019). Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) Technique Applicable for Cost Reduction - A Review. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development.	3,05	0	2019	8	2024	40,0
Cruda, C.M., Giada, F.E., Masera, G., Seghezzi, L., & Viti, V. (2019). A BIM-based approach to façade cladding optimization: geometrical, economic, and production-control in a DfMA perspective. Proceedings of the 2019 European Conference on Construction in Construction.	1		2019	8	2024	40,0
Hackett, C. (2019). DFMA: An Enabler of a Lean Enterprise 2019 International Forum on Design for Manufacture and Assembly.	1	0	2019	8	2024	40,0
Trinder, L. (2018). Design for manufacture and assembly: its benefits and risks in the UK water industry. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law.	1,8	7	2018	8	2024	39,0
Ngatilah, Y., Pulansari, F., Ernawati, D., Pujiastuti, C., Parwati, C., & Prasetyo, B. (2018). Design for Manufacture and Assembly for Product Development (Case study : Emergency Lamp). Journal of Physics: Conference Series, 953.	4,8	6	2018	8	2024	38,0
BanksColin, KotechaRaj, CurtisJason, DeeChristopher, PittNeil, & PapworthRichard (2018). Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly – a UK case study.	1	6	2018	8	2024	38,0
Ni, W. (2018). Re-design on Vehicle Front Support Structure Using DFMA.	1	3	2018	8	2024	35,0
Soh, M.F., Barbeau, D.S., Doré, S., & Forgues, D. (2018). Creative Construction Conference 2018 , CCC 2018 , 30 June-3 July 2018 , Ljubljana , Slovenia Design rules to improve efficiency in the steel construction industry.	1	3	2018	8	2024	35,0
Pinheiro, N.M., Ordóñez, R.E., Barbosa, G.L., & Dedini, F.G. (2018). Computational simulation applied in choosing the best solution in a product development using design for manufacturing and assembly approach. Brazilian Journal of Operations & Production Management.	1,9	2	2018	8	2024	34,0
TrinderLyndon, BrowneJohn, & BrocklebankKieran (2018). A client's perspective of design for manufacture and assembly in the UK water industry.	1	2	2018	8	2024	34,0
Kremer, P. (2018). Design for Mass Customised Manufacturing and Assembly (DfMCMA) : A New Framework for Mass Timber Construction.	1	2	2018	8	2024	34,0
Samsudin, H., Rosli, M.F., & Effendi, M.S. (2018). Analysis and redesign of mini washing machine using design for manufacturing and assembly.	1	1	2018	8	2024	33,0
Merja, P., & Harri, E. (2018). Challenges of manufacturability and product data management in bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 2137 - 2148.	2,9	0	2018	8	2024	32,0
Underwood, J., Shelbourn, M.A., Fleming, A., Heywood, J., & Roberts, I. (2018). Streamlining a Design, Manufacture, and Fitting Workflow Within a UK Fit-Out SME: A BIM Implementation Case Study.	1	0	2018	8	2024	32,0
Teodosio, B., Baduge, S., Ngo, T.D., Mendis, P., Tecer, M., & Heath, D. (2018). A Feasibility Review of innovative Prefabricated Footing Systems for Residential Structures.	1	0	2018	8	2024	32,0
Chandrasekar, M., Kamban, S.W., Ashok, R., Karthika, T., Prasath, T.P., & Gowtham, K. (2018). Design and Fabrication of Multi Purpose Wood Working Machine.	1	0	2018	8	2024	32,0
Lozano, M.A., Marmol, H.D., & Dória, Y.E. (2018). Aplicación del método de diseño para manufactura y ensamblaje a un vehículo de tracción humana de tres ruedas como alternativa de transporte en la ciudad de Montería.	1	0	2018	8	2024	32,0

Anexo B - MÉTODO ORDINÁTIO

Inteligência Artificial						
Articles on technology transfer model (autor, year, journal)	Impact factor (phase 6)	Citations (phase 6)	Year (phase 6)	ALFA	ANO ATUAL	InOrdinatio (phase 7)
Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. <i>Automation in Construction</i> , 122, 103517.	10,3	369	2021	8	2024	425,0
Singh, S.K., Rathore, S., & Park, J.H. (2020). BlockIoTIntelligence: A Blockchain-enabled Intelligent IoT Architecture with Artificial Intelligence. <i>Future Gener. Comput. Syst.</i> , 110, 721-743.	0,5	313	2020	8	2024	361,0
Abioye, S., Oyedele, L.O., Àkànbí, L.A., Ajayi, A.O., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., Akinadé, O.O., & Ahmed, A.A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. <i>Journal of Building Engineering</i> .	6,4	293	2021	8	2024	349,0
Darko, A., Chan, A.P., Adabre, M.A., Edwards, D.J., Hosseini, M.R., & Ameyaw, E.E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. <i>Automation in Construction</i> , 112, 103081.	10,3	257	2020	8	2024	305,0
Young, D., Panthi, K., & Noor, O. (2021). Challenges Involved in Adopting BIM on the Construction Jobsite. <i>Journal of Building Engineering</i>	6,4	185	2021	8	2024	241,0
Akinosho, T.D., Oyedele, L.O., Bilal, M., Ajayi, A.O., Delgado, M.D., Akinadé, O.O., & Ahmed, A.A. (2020). Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. <i>Journal of building engineering</i> , 32, 101827.	6,4	190	2020	8	2024	238,0
Pillai, V.S., & Matus, K.J. (2021). Towards a responsible integration of artificial intelligence technology in the construction sector. <i>Science and Public Policy</i> .	2,7	120	2021	8	2024	176,0
Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2019). A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	128	2019	8	2024	168,0
Song, H., Bai, J., Yi, Y.C., Wu, J., & Liu, L. (2020). Artificial Intelligence Enabled Internet of Things: Network Architecture and Spectrum Access. <i>IEEE Computational Intelligence Magazine</i> , 15, 44-51.	10,3	109	2020	8	2024	157,0
Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., & Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning.	8,2	100	2021	8	2024	156,0
Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R.Y. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. <i>Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity</i> .	0,6	84	2022	8	2024	148,0
Alahi, M.E., Sukkuea, A., Tina, F.W., Nag, A., Kurdthongmee, W., Suwannarat, K., & Mukhopadhyay, S.C. (2023). Integration of IoT-Enabled Technologies and Artificial Intelligence (AI) for Smart City Scenario: Recent Advancements and Future Trends. <i>Sensors (Basel, Switzerland)</i> , 23.	3,4	64	2023	8	2024	136,0
As, I., Pal, S., & Basu, P. (2018). Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via deep learning. <i>International Journal of Architectural Computing</i> , 16, 306 - 327.	1,6	99	2018	8	2024	131,0
Shukla, A.K., Janmajaya, M., Abraham, A., & Muhuri, P.K. (2019). Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988-2018). <i>Eng. Appl. Artif. Intell.</i> , 85, 517-532.	7,8	84	2019	8	2024	124,0
Rovzanec, J.M., Novalija, I., Zajec, P., Kenda, K., Tavakoli, H., Suh, S., Veliou, E., Papamartzivanos, D., Giannetsos, T., Menesidou, S., Alonso, R., Cauli, N., Meloni, A., Recupero, D.R., Kyriazis, D., Sofianidis, G., Theodoropoulos, S., Fortuna, B., Mladenic, D., & Soldatos, J. (2022). Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications. <i>International Journal of Production Research</i> , 61, 6847 - 6872.	7	57	2022	8	2024	121,0
Pena, M.L., Carballal, A., Rodriguez-Fernandez, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture. <i>Automation in Construction</i> , 124, 103550.	10,3	56	2021	8	2024	112,0
Oluleye, B.I., Chan, D.W., & Antwi-Afari, P. (2022). Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry: A critical review. <i>Sustainable Production and Consumption</i> .	10,9	39	2022	8	2024	103,0
Zhang, F., Chan, A., Darko, A., Chen, Z., & Li, D.Z. (2022). Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. <i>Automation in Construction</i> .	10,3	37	2022	8	2024	101,0
Manzoor, B., Othman, I., Durdyev, S., Ismail, S., & Wahab, M.H. (2021). Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development—A Systematic Literature Review. <i>Applied System Innovation</i> .	3,8	42	2021	8	2024	98,0
Wang, X.Q., Chen, P., Chow, C.L., & Lau, D. (2023). Artificial-intelligence-led revolution of construction materials: From molecules to Industry 4.0. <i>Matter</i> .	17,3	25	2023	8	2024	97,0
Srivastava, A.K., Jawaid, S., Singh, R., Gehlot, A., Akram, S.V., Priyadarshi, N., & Khan, B. (2022). Imperative Role of Technology Intervention and Implementation for Automation in the Construction Industry. <i>Advances in Civil Engineering</i> .	1,5	29	2022	8	2024	93,0

Rane, N.L. (2023). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. SSRN Electronic Journal.	1	21	2023	8	2024	93,0
Basu, P., Cantrell, B.E., Zhang, Z., & Liu, X. (2023). The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture.	1	18	2023	8	2024	90,0
Zhu, S., Ota, K., & Dong, M. (2022). Energy-Efficient Artificial Intelligence of Things With Intelligent Edge. IEEE Internet of Things Journal, 9, 7525-7532.	8,2	25	2022	8	2024	89,0
Kumar, V., Ramesh, G., Ananda, J., Piyush, R., & Pareek, K. (2023). Robotic Attendance Scheme in the Classroom Using Artificial Intelligence and Internet of Things. 2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC), 1-6.	1	17	2023	8	2024	89,0
Nabizadeh Rafsanjani, H., & Nabizadeh, A.H. (2023). Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry. Computers in Human Behavior Reports.	4,9	16	2023	8	2024	88,0
Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R.Y. (2022). Artificial Intelligent Technologies for the Construction Industry: How Are They Perceived and Utilized in Australia? Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity.	1,3	24	2022	8	2024	88,0
Ahmed, M., AlQadhi, S., Mallick, J., Kahla, N.B., Le, H., Singh, C.K., & Hang, H.T. (2022). Artificial Neural Networks for Sustainable Development of the Construction Industry.	1	21	2022	8	2024	85,0
Liu, Q., Ma, Y., Chen, L., Pedrycz, W., Skibniewski, M.J., & Chen, Z. (2024). Artificial intelligence for production, operations and logistics management in modular construction industry: A systematic literature review. Inf. Fusion, 109, 102423.	14,7	3	2024	8	2024	83,0
Parsaijari, F., Elezaj, O., Ekundayo, D., Vakaj, E., Parmar, M., & Ahmad wani, M. (2024). Automation in Construction Cost Budgeting using Generative Artificial Intelligence. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Management Science.	10,3	0	2024	8	2024	80,0
Rangasamy, V., & Yang, J. (2024). The convergence of BIM, AI and IoT: Reshaping the future of prefabricated construction. Journal of Building Engineering.	6,4		2024	8	2024	80,0
Pan, M., Yang, Y., Zheng, Z., & Pan, W. (2022). Artificial Intelligence and Robotics for Prefabricated and Modular Construction: A Systematic Literature Review. Journal of Construction Engineering and Management.	4,1	16	2022	8	2024	80,0
Ghansah, F.A., & Edwards, D.J. (2024). Digital Technologies for Quality Assurance in the Construction Industry: Current Trend and Future Research Directions towards Industry 4.0. Buildings.	3,8		2024	8	2024	80,0
Carpenter, C. (2024). Rig Automation Empowers Well Construction in Ecuador. Journal of Petroleum Technology.	2,4	0	2024	8	2024	80,0
Tuz, A., & Sertyesnik, B. (2024). The Preliminary Step Towards Conceptual Model for the Artificial Intelligence-Neuro-Green Marketing in the Architectural Engineering and Construction Industry. Journal of Technology in Architecture Design and Planning.	1	0	2024	8	2024	80,0
Rigillo, M. (2023). Neil Leach. Architecture in the Age of Artificial Intelligence. An Introduction to AI for Architects. TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment.	0,4	8	2023	8	2024	80,0
Mohapatra, A., Mohammed, A.R., & Panda, S. (2023). Role of Artificial Intelligence in the Construction Industry – A Systematic Review. IJARCEE.	4,5	7	2023	8	2024	79,0
Bölek, B., Tural, O., & Özbaşaran, H. (2023). A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. Journal Of Design for Resilience in Architecture & Planning.	0,2	7	2023	8	2024	79,0
Razi, P., Sulaiman, S., Ali, M.B., Ramli, N.S., Saad, M., Jamaludin, O., & Doh, S. (2023). How Artificial Intelligence Changed the Construction Industry in Safety Issues. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1140.	1	6	2023	8	2024	78,0
Rane, N.L. (2023). ChatGPT and Similar Generative Artificial Intelligence (AI) for Building and Construction Industry: Contribution, Opportunities and Challenges of Large Language Models for Industry 4.0, Industry 5.0, and Society 5.0. SSRN Electronic Journal.	1	6	2023	8	2024	78,0
Fernberg, P., & Chamberlain, B.C. (2023). Artificial Intelligence in Landscape Architecture. Landscape Journal, 42, 13 - 35.	1,3	5	2023	8	2024	77,0
Morandin-Ahuerma, Fabio. What is Artificial Intelligence. [s. l.], v. 3, n. 12, 2022	5,6	12	2022	8	2024	76,0
Na, S., Heo, S., Choi, W., Kim, C.M., & Whang, S. (2023). Artificial Intelligence (AI)-Based Technology Adoption in the Construction Industry: A Cross National Perspective Using the Technology Acceptance Model. Buildings.	3,8	4	2023	8	2024	76,0
Onososen, A.O., & Musonda, I. (2022). Perceived Benefits of Automation and Artificial Intelligence in the AEC Sector: An Interpretive Structural Modeling Approach. Frontiers in Built Environment.	2,2	12	2022	8	2024	76,0
Kudless, A. (2023). Hierarchies of bias in artificial intelligence architecture: Collective, computational, and cognitive. International Journal of Architectural Computing, 21, 256 - 279.	1,6	4	2023	8	2024	76,0
Kulejewski, J., & Roslon, J. (2023). Optimization of Ecological and Economic Aspects of the Construction Schedule with the Use of Metaheuristic Algorithms and Artificial Intelligence. Sustainability.	3,3	3	2023	8	2024	75,0

Tjebane, M.M., Musonda, I., & Okoro, C.S. (2022). Organisational Factors of Artificial Intelligence Adoption in the South African Construction Industry. <i>Frontiers in Built Environment</i> .	2,2	11	2022	8	2024	75,0
Ghimire, P., Kim, K., & Acharya, M. (2023). Generative AI in the Construction Industry: Opportunities & Challenges. <i>ArXiv</i> , abs/2310.04427.	1	3	2023	8	2024	75,0
Kane, N.L., Choudhary, S., & Kane, J. (2023). Integrating Building Information Modeling (BIM) with ChatGPT, Bard, and similar generative artificial intelligence in the architecture, engineering, and construction industry: applications, a novel framework, and future research. <i>Journal of Building Information Modeling</i> , 1-15.	1	3	2023	8	2024	75,0
Chen, Y., Zou, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Qian, X., Fu, L., Wang, K., Semm, A., Issakov, A., & Koco-vic, A. (2021). A review study of application of artificial intelligence in construction management and composite beams. <i>Steel and Composite Structures</i> , 20, 1-15.	4,6	18	2021	8	2024	74,0
Adeel, M., Zaib, S., Awaz, M., Ali, M.A., Prodhan, M.S., Akter, M.J., Hasan, M.M., Kalsoom, H., Ul Nissa, L., & Amir, R. (2023). Building Information Modeling and Artificial Intelligence Based Smart Construction Management: Materials and Electrical. <i>European Journal of Theoretical and Applied Sciences</i> .	2,8	2	2023	8	2024	74,0
Parveen, D.R. (2019). Artificial Intelligence in construction industry: Legal issues and Regulatory Challenges.	1,7	34	2019	8	2024	74,0
Liu, C., Sepasgozar, S.M., Shirowzhan, S., & Mohammadi, G. (2021). Applications of object detection in modular construction based on a comparative evaluation of deep learning algorithms. <i>Construction Innovation: Information, Process, Management</i> .	1,1	18	2021	8	2024	74,0
Korke, P., Gobinath, R., Shewale, M., & Khartode, B. (2023). Role of Artificial Intelligence in Construction Project Management. <i>E3S Web of Conferences</i> .	1	2	2023	8	2024	74,0
Martinez, E., & Cisterna, D. (2023). Using Low-Code and Artificial Intelligence to Support Continuous Improvement in the Construction Industry. <i>Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)</i> .	1	2	2023	8	2024	74,0
Abdine, S., Elmaghrabi, M.F., & Elmaghrabi, M.A. (2023). Automation in Construction Industry: A Systematic Review. <i>Journal of Building Information Modeling</i> , 1-15.	10,3	1	2023	8	2024	73,0
Rampini, L., & Cecconi, F.R. (2022). Artificial intelligence in construction asset management: a review of present status, challenges and future opportunities. <i>J. Inf. Technol. Constr.</i> , 27, 884-913.	5,15	9	2022	8	2024	73,0
Savio, R.D., & Ali, J.M. (2023). Artificial Intelligence in Project Management & Its Future. <i>Saudi Journal of Engineering and Technology</i> .	4,8	1	2023	8	2024	73,0
Mostafa, A.L., Mohamed, M.A., Ahmed, S., & Youssef, W.M. (2023). Application of Artificial Intelligence Tools with BIM Technology in Construction Management: Literature Review. <i>International Journal of BIM and Engineering Science</i> .	4,1	1	2023	8	2024	73,0
Zabala-Vargas, S., Jaimes-Quintanilla, M., & Jimenez-Barrera, M.H. (2023). Big Data, Data Science, and Artificial Intelligence for Project Management in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Systematic Review. <i>Buildings</i> .	3,8	1	2023	8	2024	73,0
Heo, S., Han, S., Shin, Y., & Na, S. (2021). Challenges of Data Refining Process during the Artificial Intelligence Development Projects in the Architecture, Engineering and Construction Industry. <i>Applied Sciences</i> .	2,8	17	2021	8	2024	73,0
Egwim, C.N., Aduka, H., Demir, E., Barogun, H., Olu-Ajayi, K., Sulaimon, L., Wusu, G., Yusuf, W., & Mudeen, A.A. (2023). Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle. <i>Frontiers in Built Environment</i> .	1,8	1	2023	8	2024	73,0
Pilyay, I. (2023). Using artificial intelligence systems to estimate the time and cost of a construction project. <i>Construction and Architecture</i> .	0,1	1	2023	8	2024	73,0
Park, C., Dawood, N., Rahimian, F.P., & Pedro, A. (2023). SPECIAL ISSUE EDITORIAL: The future of construction in the context of digital transformation (CONVR 2022). <i>J. Inf. Technol. Constr.</i> , 28, 515-518.	5,15	0	2023	8	2024	72,0
Victor, N.O. (2023). The Application of Artificial Intelligence for Construction Project Planning. <i>Journal of Advances in Artificial Intelligence</i> .	4,5	0	2023	8	2024	72,0
Liu, K., & Lin, M. (2021). Performance Assessment on the Application of Artificial Intelligence to Sustainable Supply Chain Management in the Construction Material Industry. <i>Sustainability</i> .	3,3	16	2021	8	2024	72,0
Yahaya, B., Ahmed, A.A., & Anikajogun, B.O. (2023). Economic Sustainability of Building and Construction Projects Based on Artificial Intelligence Techniques. <i>The Asian Review of Civil Engineering</i> .	2,3	0	2023	8	2024	72,0
Lialuk, O., & Osypenko, R. (2023). FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION. Modern technology, materials and design in construction.	2	0	2023	8	2024	72,0
Sarkar, D. (2023). Automation of Construction Projects through Application of Artificial Intelligence. <i>International Journal of Membrane Science and Technology</i> .	1	0	2023	8	2024	72,0
Dekhterev, D. (2023). Damage detection method for reinforced concrete structures based on technical vision. <i>E3S Web of Conferences</i> .	1	0	2023	8	2024	72,0
Li, X., Li, M., Tan, Y., & Wang, Y. (2023). Optimization and application of artificial intelligence in robotic automated distribution network overhead line engineering. <i>EAI Endorsed Trans. Energy Web</i> , 10.	1	0	2023	8	2024	72,0

Ivanov-Kostetskyi, S. (2023). Revolution in the construction industry (2020-2023): how artificial intelligence is shaping the future of construction. Current problems of architecture and urban planning.	1	0	2023	8	2024	72,0
Garyaev, N., & Garyaev, A.B. (2023). Application of artificial intelligence and neural network technologies in the construction industry. E3S Web of Conferences.	1	0	2023	8	2024	72,0
Kaurage, A., Tomar, P.K., Pant, R., Debnath, L., Ibrahim, K.K., & Alazzam, M.B. (2023). Revolutionizing Material Selection in Construction 4.0: A Comparative Analysis of Artificial Intelligence Technologies. 2023 3rd International Conference on Advanced Computing Technologies in Engineering (ICACTE). 3702-3712.	1	0	2023	8	2024	72,0
Kraus, K., Kraus, N., Hryhorkiv, M., Kuzmuk, I., & Shtepa, O. (2022). Artificial Intelligence in Established of Industry 4.0. WSEAS TRANSACTIONS ON BUSINESS AND ECONOMICS.	1	8	2022	8	2024	72,0
Eber, W. (2020). Potentials of artificial intelligence in construction management. Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal, 12, 2053 - 2063.	2,2	22	2020	8	2024	70,0
Holzmann, V., & Lechiara, M. (2022). Artificial Intelligence in Construction Projects: An Explorative Study of Professionals' Expectations. European Journal of Business and Management Research.	1,9	6	2022	8	2024	70,0
Kyivska, K., & Tsiutsiura, S. (2021). Implementation of artificial intelligence in the construction industry and analysis of existing technologies. Technology audit and production reserves, 2, 12-15.	1	14	2021	8	2024	70,0
Haman, A.O., Nawi, M.N., Rahim, M.K., Nida, F.A., & Mohamed, O. (2022). Project Managers Selection in the Construction Industry: Towards the Integration with Artificial Emotional Intelligence and Technology. Journal of Advanced Research in Applied Science and Engineering Technology.	2,8	5	2022	8	2024	69,0
Jallow, H., Renukappa, S., Suresh, S., & Rahimian, F.P. (2022). Artificial Intelligence and the UK Construction Industry – Empirical Study. Engineering Management Journal, 35, 420 - 433.	1,9	5	2022	8	2024	69,0
Mainzer, K. (2020). Verifikation und Sicherheit für Neuronale Netze und Machine Learning.	1	21	2020	8	2024	69,0
Liu, H., He, Y., Hu, Q., Guo, J., & Luo, L. (2020). Risk management system and intelligent decision-making for prefabricated building project under deep learning modified teaching-learning-based optimization. PLoS ONE, 15.	1	21	2020	8	2024	69,0
Li, D., Liu, J., Feng, L., Zhou, Y., Qi, H., & Chen, Y. (2020). Automatic modeling of prefabricated components with laser-scanned data for virtual trial assembly. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 36, 453 - 471.	8,5	20	2020	8	2024	68,0
Hooda, Y., Kuhar, P., Sharma, K.K., & Verma, N.K. (2021). Emerging Applications of Artificial Intelligence in Structural Engineering and Construction Industry. Journal of Physics: Conference Series, 1950.	3,3	12	2021	8	2024	68,0
Smith, C.J., & Wong, A.T. (2022). Advancements in Artificial Intelligence-Based Decision Support Systems for Improving Construction Project Sustainability: A Systematic Literature Review. Informatics, 9, 43.	2,7	4	2022	8	2024	68,0
Tjebane, M.M., Musonda, I., & Okoro, C.S. (2022). A Systematic Literature Review of Influencing Factors and Strategies of Artificial Intelligence Adoption in the Construction Industry. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1218.	1	4	2022	8	2024	68,0
P. Jonare, K., Wagn, V.G., & Shingram, A. (2022). Scope and impact of internet of things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in the Global Construction Industry. International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences.	0,8	4	2022	8	2024	68,0
Demetracopoulou, V., O'Brien, W.J., Kijwaja, N.A., Regnary, J., & El Asmar, M. (2022). A critical review and analysis of decision-support processes and tools for project delivery method selection. Engineering, Construction and Architectural Management.	3,6	3	2022	8	2024	67,0
Ji, L. (2022). Application and Optimization of Artificial Intelligence Technology in Architectural Design. Wireless Communications and Mobile Computing.	2,15	3	2022	8	2024	67,0
Aphirakmethawong, J., Yang, E., & Mehnen, J. (2022). An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing. 2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC), 1-6.	1	3	2022	8	2024	67,0
Harmananun, M., Karim, F., & Muran, K. (2022). Application of artificial intelligence in construction project management. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MATERIALS, COMPUTING AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (ICAMCCT 2022).	1	3	2022	8	2024	67,0
et al., O. (2022). Application of artificial intelligence in the Nigerian building and construction industry. International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES.	2,8	2	2022	8	2024	66,0
Sivaganesan, D.D. (2021). A Hybrid Architecture combining Artificial intelligence and Blockchain for IoT Applications. IRO Journal on Sustainable Wireless Systems.	1,5	10	2021	8	2024	66,0
Luca, R., Ania, K., & Fulvio, R.C. (2022). Artificial intelligence feasibility in construction industry. Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction.	1	2	2022	8	2024	66,0
Almeida Del Savio, A., Luna, A., Cárdenas-Salas, D., Vergara Olivera, M.A., & Urday Ibarra, G.T. (2022). The use of artificial intelligence to identify objects in a construction site.	1	2	2022	8	2024	66,0

Tariq, S., Hussein, M., Wang, R.D., & Zayed, T.M. (2021). Trends and developments of on-site crane layout planning 1983–2020: bibliometric, scientometric and qualitative analyzes. Construction Innovation.	3,1	9	2021	8	2024	65,0
Yang, Y., Guo, C., Liu, F., Sun, L., Liu, C., & Sun, Q. (2023). Semantic Communications With Artificial Intelligence Tasks: Reducing Bandwidth Requirements and Improving Artificial Intelligence Task Performance. IEEE Industrial Electronics Magazine, 17, 4-13.	5,6	16	2020	8	2024	64,0
Манухина, О., Клименко, М., & Сурайкина, К. (2022). Using artificial intelligence to solve the problems of the construction industry. Экономика и предпринимательство.	4	0	2022	8	2024	64,0
Chao, C. (2022). On the Teaching Mode of Artificial Intelligence General Course for Non-Computer Majors in the Vocational Higher Education Institution. Frontiers in Educational Research.	1	0	2022	8	2024	64,0
Yang, Y., Bo, B., Zheng, Y., Lu, Y., Zhou, B., Ji, H., & Shen, D. (2022). Research on power engineering solutions based on NB-IoT technology. 2022 IEEE 2nd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA), 224-228.	1	0	2022	8	2024	64,0
Krishnamoorthia, S., & Raphaela, B. (2022). A case-based reasoning technique for evaluating performance improvement in automated construction projects.	1	0	2022	8	2024	64,0
Phaladi, M.G., Mashwama, X.N., Thwala, W., & Aigbavboa, C.O. (2022). A Theoretical Assessment on the Implementation of Artificial Intelligence (AI) for an Improved Learning Curve on Construction in South Africa. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1218.	1	0	2022	8	2024	64,0
Викторина, М.Г., & Викорин, В.В. (2022). APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. Digital infocommunication technologies. Сборник научных трудов II Международной конференции "Информационные технологии в строительстве".	0,9	0	2022	8	2024	64,0
Yang, Y., & Pan, W. (2020). Automated guided vehicles in modular integrated construction: potentials and future directions. Construction Innovation: Information, Process, Management.	1,1	15	2020	8	2024	63,0
Mohamed, M.A., Ahmad, A.B., & Mohamad, D. (2021). The implementation of artificial intelligence (AI) in the Malaysia construction industry. PROCEEDINGS OF GREEN DESIGN AND MANUFACTURE 2020.	1	6	2021	8	2024	62,0
Cisterna, D., Seibel, S., Oprach, S., & Haghsheeno, S. (2021). Artificial Intelligence for the Construction Industry - A Statistical Descriptive Analysis of Drivers and Barriers. Advances in Intelligent Systems and Computing.	12	5	2021	8	2024	61,0
Wei, G. (2021). Application of BIM technology combined with artificial intelligence in construction management. Stavebni obzor - Civil Engineering Journal.	4,3	5	2021	8	2024	61,0
Bogodukhova, E., Britvina, V.V., Bobrova, E., Gavriluk, A.V., & Sorokin, A. (2021). Creation of architectural forms by combining additive and information technologies. Journal of Physics: Conference Series, 2001.	3,3	5	2021	8	2024	61,0
Ali, T.H., Akhund, M.A., Memon, N.A., Memon, A.H., Imad, H.U., & Khahro, S.H. (2019). Application of Artificial Intelligence in Construction Waste Management. 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), 50-55.	1	20	2019	8	2024	60,0
Bolpagni, M., & Bartoletti, I. (2021). Artificial Intelligence in the Construction Industry: Adoption, Benefits and Risks.	1	3	2021	8	2024	59,0
Makaula, S.Z., Munsamy, M., & Telukdarie, A. (2021). Impact of Artificial Intelligence in South African Construction Project Management Industry. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.	1	3	2021	8	2024	59,0
Bogosian, B., Bobadilla, L., Alonso, M., Elias, A., Perez, G., Alhaffar, H., & Vassigh, S. (2020). Work in Progress: Towards an Immersive Robotics Training for the Future of Architecture, Engineering, and Construction Workforce. 2020 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE), 1-4.	1	10	2020	8	2024	58,0
Ohno, K., Osumi, H., Ishigami, G., & Nagatani, K. (2021). Special issue on Advanced Construction Robot System. Advanced Robotics, 35, 1375 - 1375.	1,4	0	2021	8	2024	56,0
Zhou, C., Chai, C., Liao, J., Chen, Z., & Shi, J. (2020). Artificial intelligence augmented design iteration support. 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 354-358.	1	8	2020	8	2024	56,0
Valente, I., & Kokorelis, V. (2021). SMART BIM OBJECTS FOR INTELLIGENT MODULAR CONSTRUCTION.	1		2021	8	2024	56,0
Cherepanska, I., Melnychuk, P., & Sazonov, A. (2021). Software of high-precision goniometric complex with artificial intelligence. Scientific journal of the Ternopil national technical university.	1	0	2021	8	2024	56,0

Yin, W. (2021). Multi-Objective Optimization of Construction Schedule Based on Artificial Intelligence Optimization Algorithm. 2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture.	1	0	2021	8	2024	56,0
Parveen, D.R. (2019). ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION INDUSTRY: LEGAL ISSUES AND REGULATORY CHALLENGES.	1,7	14	2019	8	2024	54,0
Ommer, L., Gatuszka, A., & Grychowski, T. (2019). Application of Artificial Intelligence in Sustainable Building Design - Optimisation Methods. 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 81-86.	1	12	2019	8	2024	52,0
Doroshenko, A.I. (2020). Applying Artificial Neural Networks in Construction. E3S Web of Conferences.	1	3	2020	8	2024	51,0
Wang, S.C. (2020). Application Research of Artificial Intelligence Technology in Landscape Architectural Art Design. International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence.	1	2	2020	8	2024	50,0
(2019). Phases of Developing Artificial Intelligence and Proposed Conversational Agent Architecture. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.	3,4	9	2019	8	2024	49,0
Song, Y., & Wei, Y. (2020). Research on Integrated Construction Mode and Key Technologies of Regional Power Grid Dispatching System. Journal of Physics: Conference Series, 1449.	3,3	1	2020	8	2024	49,0
Taylor, K.C. (2020). Modular 3D environmental development for augmented reality. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering.	1	0	2020	8	2024	48,0
Zhang, Z., Pan, W., & Zheng, Z. (2019). Transfer Learning Enabled Process Recognition for Module Installation of High-rise Modular Buildings. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	3,8	7	2019	8	2024	47,0
Eber, W. (2019). Artificial Intelligence in Construction Management – a Perspective. Proceedings of the Creative Construction Conference 2019.	1	7	2019	8	2024	47,0
Brissi, S.G., & Debs, L. (2019). Lean, Automation and Modularization in Construction. Proc. 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC).	1	4	2019	8	2024	44,0
Greenough, T., Smith, M., & Mariash, A. (2019). Integrating Computational Design to Improve the Design Workflow of Modular Construction. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings.	1	3	2019	8	2024	43,0
Pillai, V.S., & Matus, K.J. (2019). Regulation of AI Technologies in the Construction Industry. ERN: Regulation (IO) (Topic).	1	0	2019	8	2024	40,0
Li, Y. (2019). The Application of BIM in Artificial Intelligence Management of Construction Engineering Database Project.	1	0	2019	8	2024	40,0
Krishnamoorthi, S., & Raphael, B. (2018). A Methodology for Analysing Productivity in Automated Modular Construction. Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC).	1	4	2018	8	2024	36,0
Luo, L., Yan, Z., Yang, D., Xie, J., & Wu, G. (2018). BIM Application in the Whole Life Cycle of Construction Projects in China. Construction Research Congress	1	2	2018	8	2024	34,0

Anexo C - Tabela Resumo

CONSTRUÇÃO MODULAR		
Artigo	Principal contribuição	Contribuições específicas
Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A.C., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. <i>Engineering Structures</i> .	Revisão abrangente sobre edifícios modulares de vários andares	Identifica avanços, desafios e oportunidades; analisa diferentes tipos de sistemas modulares.
Thai, H., Ngo, T.D., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. <i>Structures</i> , 28, 1265-1290.	Revisão sobre a construção modular para edifícios altos	Analisa características, desafios e tendências da construção modular em edifícios altos.
Xu, Z., Zayed, T.M., & Niu, Y. (2020). Comparative analysis of modular construction practices in mainland China, Hong Kong and Singapore. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 245, 118861.	Análise comparativa das práticas de construção modular	Analisa práticas em China, Hong Kong e Singapura, identificando diferenças e similaridades.
Wang, M., Wang, C., Sepasgozar, S.M., & Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. <i>Buildings</i> .	Revisão sobre adoção de tecnologias digitais na construção modular	Analisa tecnologias digitais adotadas na construção off-site e sua relação com a Indústria 4.0.
Goh, M.W., & Goh, Y. (2019). Lean production theory-based simulation of modular construction processes. <i>Automation in Construction</i> .	Simulação de processos de construção modular	Simula processos modulares utilizando princípios Lean, identificando gargalos e oportunidades de melhoria.
Liewa, J.Y., Daia, Z., & Chuua, Y.S. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings.	Sistemas compostos de aço e concreto para construção modular	Estuda sistemas estruturais mistos para edifícios modulares altos.
Razkenari, M., Fenner, A.E., Shojaei, A., Hakim, H., & Kibert, C.J. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. <i>Journal of building engineering</i> , 29, 101138.	Percepções sobre a construção modular nos EUA	Analisa percepções de stakeholders sobre a construção off-site.
Kamali, M., Hewage, K.N., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. <i>Energy and Buildings</i> , 204, 109479.	Análise do ciclo de vida de métodos de construção convencionais e modulares	Realiza análise de ciclo de vida (LCA) comparativa entre os dois sistemas construtivos.
Innella, F., Arashpour, M., & Bai, Y. (2019). Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. <i>Journal of Construction Engineering and Management-asce</i> , 145, 04019076.	Revisão de metodologias Lean para construção modular	Analisa a aplicação de princípios Lean na construção modular.
Li, M. (2023). Investigation of the Severity of Modular Construction Adoption Barriers with Large-Scale Group Decision Making in an Organization from Internal and External Stakeholder Perspectives. <i>Computer Modeling in Engineering & Sciences</i> .	Análise de barreiras à adoção da construção modular	Identifica barreiras internas e externas à adoção da construção modular em organizações.
Li, X., Lu, W., Xue, F., Wu, L., Zhao, R., Lou, J., & Xu, J. (2022). Blockchain-Enabled IoT-BIM Platform for Supply Chain Management in Modular Construction. <i>Journal of Construction Engineering and Management</i> .	Plataforma IoT-BIM baseada em blockchain para gestão da cadeia de suprimentos	Proposta de uma plataforma integrada para gestão da cadeia de suprimentos em construção modular.
Choi, J.O., Chen, X., & Kim, T.W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 105 - 93.	Oportunidades e desafios de métodos modulares em ambientes urbanos densos	Analisa o potencial da construção modular em áreas urbanas, considerando desafios como transporte e localização.
Li, X., Wu, L., Zhao, R., Lu, W., & Xue, F. (2021). Two-layer Adaptive Blockchain-based Supervision model for off-site modular housing production. <i>Comput. Ind.</i> , 128, 103437.	Modelo de supervisão adaptativo baseado em blockchain para produção de habitação modular	Proposta de um modelo de supervisão para garantir a qualidade e rastreabilidade na produção de módulos.
Hsu, P., Aurisicchio, M., & Angeloudis, P. (2019). Risk-averse supply chain for modular construction projects. <i>Automation in Construction</i> .	Cadeia de suprimentos resistente a riscos para projetos de construção modular	Propõe uma cadeia de suprimentos resiliente para mitigar riscos em projetos modulares.
Abdul Nabi, M., & El-adaway, I.H. (2020). Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	Fatores de decisão e necessidades de pesquisa futura na construção modular	Identifica fatores críticos de sucesso para a implementação da construção modular.
Yang, Y., Pan, M., Pan, W., & Zhang, Z. (2021). Sources of Uncertainties in Offsite Logistics of Modular Construction for High-Rise Building Projects. <i>Journal of Management in Engineering</i> , 37, 04021011.	Fontes de incertezas na logística offsite de construção modular	Analisa as fontes de incerteza na logística de módulos para edifícios altos.

Zheng, Z., Zhang, Z., & Pan, W. (2020). Virtual prototyping- and transfer learning-enabled module detection for modular integrated construction. <i>Automation in Construction</i> , 120, 103387.	Detecção de módulos para construção integrada modular	Propõe um método para detecção de módulos utilizando técnicas de visão computacional.
Yang, Y., Pan, M., & Pan, W. (2019). ‘Co-evolution through interaction’ of innovative building technologies: The case of modular integrated construction and robotics. <i>Automation in Construction</i> .	Co-evolução de tecnologias inovadoras de construção	Analisa a co-evolução de tecnologias inovadoras na construção modular.
Jeong, G., Kim, H., Lee, H., Park, M., & Hyun, H. (2021). Analysis of safety risk factors of modular construction to identify accident trends. <i>Journal of Asian Architecture and Building Engineering</i> , 21, 1040 - 1052.	Análise de fatores de risco de segurança na construção modular	Identifica fatores de risco de segurança na construção modular.
Ali, A.H., Kineber, A.F., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., & Daoud, A.O. (2023). Modelling the role of modular Construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects. <i>Journal of Building Engineering</i> .	Modelagem de fatores de sucesso críticos para construção modular em projetos de habitação	Identifica os fatores críticos para o sucesso da construção modular em um contexto específico.
Ali, A.H., Elyamany, A.H., Ibrahim, A.H., Kineber, A.F., & Daoud, A.O. (2023). Modelling the relationship between modular construction adoption and critical success factors for residential projects in developing countries. <i>International Journal of Construction Management</i> , 24, 1314 - 1325.	Relação entre adoção da construção modular e fatores de sucesso críticos	Analisa a relação entre a adoção da construção modular e os fatores de sucesso em países em desenvolvimento.
Wu, L., Lu, W., Zhao, R., Xu, J., Li, X., & Xue, F. (2022). Using Blockchain to Improve Information Sharing Accuracy in the Onsite Assembly of Modular Construction. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	Uso de blockchain para melhorar a precisão do compartilhamento de informações na montagem em campo	Propõe o uso de blockchain para garantir a integridade e a rastreabilidade das informações na montagem de módulos.
Hammad, A.W., Akbarnezhad, A., Wu, P., Wang, X., & Haddad, A.N. (2019). Building information modelling-based framework to contrast conventional and modular construction methods through selected sustainability factors. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	Comparação de métodos de construção convencionais e modulares usando BIM	Utiliza BIM para comparar os métodos convencionais e modulares em termos de sustentabilidade.
Taghaddos, H., Hermann, U., & Abbasi, A. (2018). Automated Crane Planning and Optimization for modular construction. <i>Automation in Construction</i> .	Planejamento e otimização automatizados de guindastes para construção modular	Desenvolve um sistema automatizado para planejamento e otimização do uso de guindastes na construção modular.
Pan, W., Parker, D., & Pan, M. (2023). Problematic Interfaces and Prevention Strategies in Modular Construction. <i>Journal of Management in Engineering</i> .	Interfaces problemáticas e estratégias de prevenção na construção modular	Identifica e analisa as interfaces problemáticas na construção modular e propõe estratégias para evitá-las.

Anexo C - Tabela Resumo

DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY		
Artigo	Principal contribuição	Contribuições específicas
Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. <i>Automation in Construction</i> , 88, 13-22.	Design paramétrico orientado para fabricação e montagem de pré-fabricados	Apresenta uma abordagem paramétrica para o design de pré-fabricados considerando fabricação e montagem.
Gbadamosi, A., Mahamadu, A., Oyedele, L.O., Akinadé, O.O., Manu, P., Mahdjoubi, L., & Aigbavboa, C.O. (2019). Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly. <i>Journal of Cleaner Production</i> .	Desenvolvimento de um otimizador baseado em BIM para montagem	Propõe um otimizador baseado em BIM para melhorar o processo de montagem.
Gao, S., Jin, R., & Lu, W. (2019). Design for manufacture and assembly in construction: a review. <i>Building Research & Information</i> , 48, 538 - 550.	Revisão sobre Design for Manufacture and Assembly (DfMA) na construção	Realiza uma revisão sobre o conceito de DfMA na construção, identificando principais desafios e oportunidades.
Rahimian, F.P., Chavdarova, V., Oliver, S., & Chamo, F. (2019). OpenBIM-Tango integrated virtual showroom for offsite manufactured production of self-build housing. <i>Automation in Construction</i> .	Showroom virtual integrado OpenBIM-Tango para produção offsite de habitação autoconstruída	Descreve um showroom virtual para apoio à produção offsite de habitação autoconstruída.
Alfaify, A., Saleh, M., Abdullah, F.M., & Al-Ahmari, A.M. (2020). Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. <i>Sustainability</i> .	Revisão sistemática sobre Design for Additive Manufacturing (DfAM)	Analisa o estado da arte do DfAM, identificando desafios e oportunidades.
Bakhshi, S., Chenaghlou, M.R., Pour Rahimian, F., Edwards, D.J., & Dawood, N. (2022). Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction. <i>Automation in Construction</i> .	Colaboração integrada BIM e DfMA para suporte ao envolvimento do cliente na construção offsite	Propõe uma abordagem integrada BIM e DfMA para envolvimento do cliente.
Wasim, M., Vaz Serra, P., & Ngo, T.D. (2020). Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review. <i>International Journal of Construction Management</i> , 22, 3014 - 3022.	DfMA para construção pré-fabricada sustentável, rápida e econômica	Analisa o papel do DfMA na construção pré-fabricada sustentável.
Gao, S., Low, S.P., & Nair, K. (2018). Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore. <i>Architectural Engineering and Design Management</i> , 14, 440 - 456.	Estudo preliminar dos fatores que influenciam a adoção do DfMA em Singapura	Identifica fatores que influenciam a adoção do DfMA em um contexto específico.
Lu, W., Tan, T., Xu, J., Wang, J., Chen, K., Gao, S., & Xue, F. (2020). Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new. <i>Architectural Engineering and Design Management</i> , 17, 77 - 91.	DfMA na construção: o antigo e o novo	Discute a evolução do DfMA na construção, identificando tendências e desafios.
Alwisy, A., Bu Hamdan, S., Barkokébas, B., Bouferguene, A., & Al-Hussein, M. (2019). A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. <i>International Journal of Construction Management</i> , 19, 187 - 205.	Automação BIM-based de design e desenho para fabricação de painéis de madeira para edifícios residenciais modulares	Descreve uma abordagem BIM para automatizar o processo de design e fabricação de painéis de madeira.
Wasim, M., Han, T.M., Huang, H., Madiyev, M., & Ngo, T.D. (2020). An approach for sustainable, cost-effective and optimised material design for the prefabricated non-structural components of residential buildings. <i>Journal of building engineering</i> , 32, 101474.	Abordagem para design sustentável, econômico e otimizado de materiais para componentes não estruturais pré-fabricados	Propõe uma abordagem para otimização de materiais em componentes não estruturais.
Formentini, G., Boix Rodríguez, N., & Favi, C. (2022). Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review. <i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> , 120, 4307 - 4334.	Métodos DfMA no processo de desenvolvimento de produtos mecânicos: uma revisão sistemática	Realiza uma revisão sistemática sobre o uso do DfMA em produtos mecânicos.
Gbadamosi, A., Oyedele, L.O., Mahamadu, A., Kusimo, H., Bilal, M., Delgado, J.M., & Muhammed-yakubu, N. (2020). Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction. <i>Automation in Construction</i> , 120, 103388.	Big data para repositório de opções de design: rumo a uma abordagem DfMA para construção offsite	Propõe o uso de big data para criar um repositório de opções de design para a construção offsite.

Roxas, C.L., Bautista, C.R., Dela Cruz, O.G., Dela Cruz, R.L., de Pedro, J.P., Dungca, J., Lejano, B.A., & Ongpeng, J.M. (2023). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) and Design for Deconstruction (DfD) in the Construction Industry: Challenges, Trends and Developments. Buildings.	DfMA e Design for Deconstruction (DfD) na indústria da construção: desafios, tendências e desenvolvimentos	Analisa os desafios, tendências e desenvolvimentos do DfMA e DfD na construção.
Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2022). Design for Adaptability (DfA)—Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings. Applied System Innovation.	Design for Adaptability (DfA)—Frameworks e modelos de avaliação para circularidade em edifícios	Apresenta frameworks e modelos de avaliação para o DfA em edifícios.
Cheng, Z., Tang, S., Liu, H., & Lei, Z. (2023). Digital Technologies in Offsite and Prefabricated Construction: Theories and Applications. Buildings.	Tecnologias digitais na construção offsite e pré-fabricada: teorias e aplicações	Discute o uso de tecnologias digitais na construção offsite e pré-fabricada.
Du, J., Zhang, J., Castro-Lacouture, D., & Hu, Y. (2023). Lean manufacturing applications in prefabricated construction projects. Automation in Construction.	Aplicações de manufatura enxuta em projetos de construção pré-fabricada	Analisa a aplicação de princípios Lean em projetos de construção pré-fabricada.
Li, Z., & Tsavdaridis, K.D. (2023). Design for Seismic Resilient Cross Laminated Timber (CLT) Structures: A Review of Research, Novel Connections, Challenges and Opportunities. Buildings.	Projeto para Estruturas de Madeira Laminada Cruzada (CLT) Resilientes Sísmicas: Uma Revisão da Pesquisa, Novas Conexões, Desafios e Oportunidades	Revisão sobre design de estruturas CLT resistentes a sismos.
Tan, T., Lu, W., Tan, G., Xue, F., Chen, K., Xu, J., Wang, J., & Gao, S. (2020). Construction-Oriented Design for Manufacture and Assembly Guidelines. Journal of Construction Engineering and Management-asce, 146, 04020085.	Diretrizes para o Design for Manufacture and Assembly (DfMA) orientadas para a construção	Apresenta diretrizes específicas para a aplicação do DfMA na construção.
Tuvayanond, W., & Prasittisopin, L. (2023). Design for Manufacture and Assembly of Digital Fabrication and Additive Manufacturing in Construction: A Review. Buildings.	DfMA para fabricação digital e manufatura aditiva na construção: uma revisão	Analisa o papel do DfMA na fabricação digital e manufatura aditiva na construção.
Alfieri, E., Seghezzi, E., Sauchelli, M., Di Giuda, G.M., & Masera, G. (2020). A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. Architectural Engineering and Design Management, 16, 247 - 269.	Abordagem BIM-based para DfMA na construção de edifícios: framework e primeiros resultados em um estudo de caso italiano	Apresenta um framework BIM para aplicação do DfMA em um estudo de caso específico.
Langston, C., & Zhang, W. (2021). DfMA: Towards an Integrated Strategy for a More Productive and Sustainable Construction Industry in Australia. Sustainability.	DfMA: Rumo a uma estratégia integrada para uma indústria da construção mais produtiva e sustentável na Austrália	Discute a importância do DfMA para a sustentabilidade e produtividade da construção na Austrália.
Garusinghe, G.D., Perera, B., & Weerapperuma, U.S. (2023). Integrating Circular Economy Principles in Modular Construction to Enhance Sustainability. Sustainability.	Integração de princípios de economia circular na construção modular para melhorar a sustentabilidade	Explora a aplicação da economia circular na construção modular para aumentar a sustentabilidade.
Bao, Z., Laovisutthichai, V., Tan, T., Wang, Q., & Lu, W. (2021). Design for manufacture and assembly (DfMA) enablers for offsite interior design and construction. Building Research & Information, 50, 325 - 338.	Facilitadores do DfMA para design e construção de interiores offsite	Identifica fatores que facilitam a aplicação do DfMA em projetos de interiores offsite.
Romero Quidel, G., Soto Acuña, M.J., Rojas Herrera, C.J., Rodríguez Neira, K., & Cárdenas-Ramírez, J.P. (2023). Assessment of Modular Construction System Made with Low Environmental Impact Construction Materials for Achieving Sustainable Housing Projects. Sustainability.	Avaliação de sistema de construção modular feito com materiais de baixo impacto ambiental para alcançar projetos habitacionais sustentáveis	Avalia o desempenho ambiental de sistemas de construção modular utilizando materiais de baixo impacto.

Anexo C - Tabela Resumo

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL		
Artigo	Principal contribuição	Contribuições específicas
Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. <i>Automation in Construction</i> , 122, 103517.	Revisão crítica dos papéis da IA na engenharia e gestão da construção	Analisa os diferentes papéis da IA na construção, identificando desafios e oportunidades.
Singh, S.K., Rathore, S., & Park, J.H. (2020). BlockIoTIntelligence: A Blockchain-enabled Intelligent IoT Architecture with Artificial Intelligence. <i>Future Gener. Comput. Syst.</i> , 110, 721-743.	Arquitetura inteligente IoT habilitada por blockchain com inteligência artificial	Propõe uma arquitetura integrada de IoT, blockchain e IA para aplicações diversas.
Abioye, S., Oyedele, L.O., Àkànbí, L.A., Ajayi, A.O., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., Akinadé, O.O., & Ahmed, A.A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. <i>Journal of Building Engineering</i> .	Revisão sobre o estado atual, oportunidades e desafios da IA na indústria da construção	Analisa o estado da arte da IA na construção, identificando áreas de aplicação e desafios.
Darko, A., Chan, A.P., Adabre, M.A., Edwards, D.J., Hosseini, M.R., & Ameyaw, E.E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. <i>Automation in Construction</i> , 112, 103081.	Análise cientométrica e visualização das atividades de pesquisa em IA na indústria AEC	Realiza uma análise bibliométrica da pesquisa em IA na indústria AEC.
Young, D., Panthi, K., & Noor, O. (2021). Challenges Involved in Adopting BIM on the Construction Jobsite. <i>Journal of Building Engineering</i>	Desafios na adoção do BIM em canteiro de obras	Identifica desafios na implementação do BIM em canteiro de obras.
Akinosho, T.D., Oyedele, L.O., Bilal, M., Ajayi, A.O., Delgado, M.D., Akinadé, O.O., & Ahmed, A.A. (2020). Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. <i>Journal of building engineering</i> , 32, 101827.	Aprendizado profundo na indústria da construção: estado atual e inovações futuras	Analisa o uso do aprendizado profundo na construção, identificando aplicações e desafios.
Pillai, V.S., & Matus, K.J. (2021). Towards a responsible integration of artificial intelligence technology in the construction sector. <i>Science and Public Policy</i> .	Integração responsável da tecnologia de inteligência artificial no setor da construção	Discute a importância da integração responsável da IA na construção.
Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2019). A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. <i>Automation in Construction</i> .	Análise cientométrica e revisão crítica das aplicações de visão computacional na construção	Analisa o uso da visão computacional na construção, identificando áreas de aplicação e desafios.
Song, H., Bai, J., Yi, Y.C., Wu, J., & Liu, L. (2020). Artificial Intelligence Enabled Internet of Things: Network Architecture and Spectrum Access. <i>IEEE Computational Intelligence Magazine</i> , 15, 44-51.	Internet das coisas habilitada por inteligência artificial: arquitetura de rede e acesso ao espectro	Discute a arquitetura de rede e acesso ao espectro para IoT habilitada por IA.
Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., & Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning.	Aprendizado de máquina na construção: de aprendizado raso a profundo	Analisa a evolução do aprendizado de máquina na construção.
Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R.Y. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. <i>Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity</i> .	Oportunidades e desafios da adoção da IA na construção	Analisa as oportunidades e desafios da adoção da IA na construção.
Alahi, M.E., Sukkuea, A., Tina, F.W., Nag, A., Kurdthongmee, W., Suwannarat, K., & Mukhopadhyay, S.C. (2023). Integration of IoT-Enabled Technologies and Artificial Intelligence (AI) for Smart City Scenario: Recent Advancements and Future Trends. <i>Sensors (Basel, Switzerland)</i> , 23.	Integração de IoT e IA para cidades inteligentes	Explora a integração de IoT e IA para criar cidades inteligentes.
As, I., Pal, S., & Basu, P. (2018). Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via deep learning. <i>International Journal of Architectural Computing</i> , 16, 306 - 327.	Geração de design conceitual através de aprendizado profundo	Utiliza aprendizado profundo para gerar designs conceituais.
Shukla, A.K., Janmajaya, M., Abraham, A., & Muhuri, P.K. (2019). Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988-2018). <i>Eng. Appl. Artif. Intell.</i> , 85, 517-532.	Aplicações de IA na engenharia: análise bibliométrica	Realiza uma análise bibliométrica das aplicações de IA na engenharia.

Rovzanec, J.M., Novalija, I., Zajec, P., Kenda, K., Tavakoli, H., Suh, S., Veliou, E., Papamartzivanos, D., Giannetos, T., Menesidou, S., Alonso, R., Cauli, N., Meloni, A., Recupero, D.R., Kyriazis, D., Sofianidis, G., Theodoropoulos, S., Fortuna, B., Mladenic, D., & Soldatos, J. (2022). Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications. <i>International Journal of Production Research</i> , 61, 6847 - 6872.	Arquitetura de IA centrada no ser humano para aplicações da Indústria 5.0	Propõe uma arquitetura de IA que coloca o ser humano no centro das aplicações da Indústria 5.0.
Pena, M.L., Carballal, A., Rodriguez-Fernandez, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture. <i>Automation in Construction</i> , 124, 103550.	IA aplicada ao design conceitual: uma revisão	Analisa o uso da IA no design conceitual em arquitetura.
Oluleye, B.I., Chan, D.W., & Antwi-Afari, P. (2022). Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry: A critical review. <i>Sustainable Production and Consumption</i> .	Adoção de IA para aprimorar a implementação da circularidade sistêmica na indústria da construção	Explora o uso da IA para promover a circularidade na construção.
Zhang, F., Chan, A., Darko, A., Chen, Z., & Li, D.Z. (2022). Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. <i>Automation in Construction</i> .	Aplicações integradas de BIM e IA na indústria AEC/FM	Analisa a integração de BIM e IA na indústria AEC/FM.
Manzoor, B., Othman, I., Durdyev, S., Ismail, S., & Wahab, M.H. (2021). Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development—A Systematic Literature Review. <i>Applied System Innovation</i> .	Influência da IA na engenharia civil para o desenvolvimento sustentável	Analisa a influência da IA na engenharia civil para promover a sustentabilidade.
Wang, X.Q., Chen, P., Chow, C.L., & Lau, D. (2023). Artificial-intelligence-led revolution of construction materials: From molecules to Industry 4.0. <i>Matter</i> .	Revolução dos materiais de construção liderada pela IA: das moléculas à Indústria 4.0	Explora o uso da IA no desenvolvimento de novos materiais de construção.
Srivastava, A.K., Jawaid, S., Singh, R., Gehlot, A., Akram, S.V., Priyadarshi, N., & Khan, B. (2022). Imperative Role of Technology Intervention and Implementation for Automation in the Construction Industry. <i>Advances in Civil Engineering</i> .	Papel crucial da intervenção e implementação tecnológica para a automação na indústria da construção	Discute a importância da tecnologia e da automação na indústria da construção.
Rane, N.L. (2023). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. <i>SSRN Electronic Journal</i> .	Integração de IA, IoT e big data para arquitetura, engenharia e construção inteligentes e sustentáveis	Explora a integração de IA, IoT e big data na indústria AEC.
Basu, P., Cantrell, B.E., Zhang, Z., & Liu, X. (2023). <i>The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture</i> .	Companheiro Routledge sobre Inteligência Artificial em Arquitetura	Uma obra abrangente sobre a aplicação da IA em arquitetura.
Zhu, S., Ota, K., & Dong, M. (2022). Energy-Efficient Artificial Intelligence of Things With Intelligent Edge. <i>IEEE Internet of Things Journal</i> , 9, 7525-7532.	Internet das Coisas com Inteligência Artificial de baixo consumo de energia com borda inteligente	Discute o desenvolvimento de IoT com IA de baixo consumo de energia.
Kumar, V., Ramesh, G., Ananda, J., Piyush, R., & Pareek, K. (2023). Robotic Attendance Scheme in the Classroom Using Artificial Intelligence and Internet of Things. <i>2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC)</i> , 1-6.	Sistema de atendimento robótico em sala de aula usando IA e IoT	Propõe um sistema de atendimento robótico em sala de aula utilizando IA e IoT.