

OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS EM FASES INICIAIS DO PROJETO DE ARQUITETURA

Uma Proposta DfMA Aplicada à Habitação a
Custos Controlados Utilizando Ferramentas
Digitais

ANNA CECÍLIA FARIAS GOBBI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Orientadora: Professora Doutora Bárbara Rangel Carvalho

Coorientadora: Professora Caroline Minetto

JUNHO 2026

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ 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

✉ 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 de Edifícios - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

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

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

À Elaine Maria Gobbi e Antônio Carlos Gobbi

Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido.

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha tia Elaine Gobbi e ao meu pai Carlos Gobbi, que tornaram esta trajetória possível. Agradeço aos meus amigos que me acompanharam ao longo do percurso, especialmente ao meu amigo Pablo Porto e à minha amiga Heloísa Souza. Agradeço à professora Bárbara Rangel, minha estimada orientadora, bem como à minha amiga e coorientadora Caroline Minetto. Agradeço também ao engenheiro António Carreira, da empresa KREAR, que providenciou todo o suporte técnico necessário para que este trabalho se concretizasse. Esta pesquisa é, antes de mais, fruto de um esforço coletivo do qual tive o privilégio de fazer parte.

RESUMO

A presente dissertação investiga a aplicação prática dos princípios de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA) no desenvolvimento de sistemas de fachada pré-fabricados em betão para Habitação a Custos Controlados (HCC), com enfoque na otimização de custos através de ferramentas digitais paramétricas e processos de design generativo. Parte-se da hipótese de que a incorporação das condicionantes de fabrico e montagem nas fases iniciais da conceção arquitetónica aumenta a eficiência do projeto e reduz os custos globais da construção. A revisão da literatura demonstra que, embora a relação entre construção modular e ferramentas digitais seja amplamente estudada, a sua aplicação ao contexto da Habitação a Custos Controlados permanece pouco explorada. Face a esta lacuna, desenvolve-se um caso de estudo com o objetivo de contribuir para este campo de pesquisa.

O caso de estudo estrutura-se em três etapas:

(1) realiza-se modelagem BIM de painéis de fachada em betão produzidos pela empresa KREAR e a sua aplicação num projeto pré-existente de Habitação a Custos Controlados; (2) desenvolve-se a parametrização da geometria em ambiente Grasshopper, recorrendo a ferramentas de design generativo para produzir composições de fachada otimizadas segundo critérios de custo. Nesta fase, as restrições de fabrico e montagem são incorporadas como regras de desenho, estabelecendo parâmetros geométricos compatíveis com as capacidades de produção e montagem dos componentes; (3) procede-se à comparação entre a solução obtida pelo método tradicional de projeto e a solução desenvolvida com base nos princípios de DfMA, associados ao design computacional, avaliando se a integração de parâmetros produtivos e construtivos no processo de conceção conduz a ganhos efetivos de otimização económica, tanto na produção como na montagem dos painéis.

A metodologia proposta permite avaliar a contribuição das ferramentas digitais como apoio ao arquiteto e projetista, especialmente no controlo de custos aplicados às Habitações a Custos Controlados. A pesquisa demonstra que a transposição do conceito teórico de DfMA para uma aplicação prática e parametrizada possibilita integrar desenho, fabrico e montagem num único fluxo de trabalho, permitindo e facilitando a análise dos resultados por parte da equipa de projeto. Como resultado, é possível concluir que a adoção de métodos de projeto computacional associada aos princípios de industrialização pode contribuir significativamente para a tomada de decisão orientada por desempenho ainda em fases iniciais de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Design-for-manufacture-and-assembly, Habitação-a-custos-controlados, Otimização, Industrialização, Parametrização.

ABSTRACT

This research investigates the practical application of Design for Manufacture and Assembly (DfMA) principles in the development of precast concrete facade systems for Social Housing (SH), focusing on cost optimization through parametric digital tools and generative design processes. It is based on the hypothesis that incorporating manufacturing and assembly constraints into the early stages of architectural design improves project efficiency and reduces overall construction costs. The literature review demonstrates that, although the relationship between modular construction and digital tools has been widely investigated, its application in the Social Housing context remains underexplored. To address this research gap, a case study is developed to contribute to this field of research.

The case study is structured into three stages:

(1) BIM modelling of precast concrete facade panels manufactured by the company KREAR, and their application to a pre-existing Social Housing project; (2) development of a parametric model in the Grasshopper environment, using generative design tools to produce facade configurations optimized according to cost criteria. At this stage, manufacturing and assembly constraints are embedded as design rules, establishing geometric parameters compatible with the production and installation capabilities of the components; (3) comparison between the solution obtained through the traditional design approach and the solution developed based on DfMA principles combined with computational design, assessing whether the integration of manufacturing and construction parameters into the design process leads to measurable economic optimization in both the production and assembly of facade panels.

The proposed methodology enables the evaluation of digital tools as decision-support instruments for architects and designers, particularly in cost control for SH projects. The research demonstrates that translating the theoretical concept of DfMA into a practical, parametric application enables the integration of design, manufacturing, and assembly within a single workflow, facilitating the analysis and evaluation of design alternatives by the project team. The findings indicate that adopting computational design methods in combination with industrialization principles can make a significant contribution to performance-based decision-making during the early stages of the design process.

KEYWORDS: Design-for-Manufacture-and-Assembly, Social-Housing, Optimization, Industrialization, Parametric-Design.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO.....	1
1.2 PERTINÊNCIA DO ESTUDO	3
1.3 PROBLEMA DA PESQUISA.....	3
1.4 OBJETIVOS	5
1.5 METODOLOGIA.....	5
1.6 RESULTADOS ESPERADOS	5
2 ESTADO DA ARTE.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 PALAVRAS-CHAVE	7
2.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	8
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.5 HABITAÇÃO A CUSTOS CONTROLADOS.....	20
2.6 PESQUISA DE MERCADO	23
2.6.1 The Grange University Hospital, Llanfrechfa, Cwmbran, South Wales 202025	
2.6.2 'Q2', King's Cross Sports Hall, King's Cross, London 2020	27
2.7 SÍNTESE	28

3	CASO DE ESTUDO	31
3.1	INTRODUÇÃO	31
3.2	PERTINÊNCIA DO CASO DE ESTUDO	31
3.3	ENQUADRAMENTO	32
3.4	OBJETIVOS	34
3.4.1	Objetivo geral	34
3.4.2	Objetivos específicos	34
3.5	METODOLOGIA	34
3.5.1	Métodos	34
3.5.2	Ferramentas	36
3.6	PLANO EXPERIMENTAL	40
3.6.1	Resultados Esperados	40
3.6.2	Etapa 1	40
3.6.2.1	<i>Apresentação do “Projeto Catavento” utilizado para Caso de Estudo:</i>	<i>41</i>
3.6.2.2	<i>Procedimento</i>	<i>45</i>
3.6.2.3	<i>Precificação do Material</i>	<i>47</i>
3.6.2.4	<i>Restrições de Transporte</i>	<i>48</i>
3.6.2.5	<i>Resultado</i>	<i>48</i>
3.6.3	Etapa 2	50
3.6.3.1	<i>Introdução à Precificação</i>	<i>51</i>
3.6.3.2	<i>Logística</i>	<i>53</i>
3.6.3.3	<i>Mão de Obra</i>	<i>55</i>
3.6.3.4	<i>Montagem</i>	<i>57</i>
3.6.3.5	<i>Procedimento</i>	<i>58</i>
3.6.3.6	<i>Resultado</i>	<i>68</i>
3.6.4	Etapa 3	70
3.6.4.1	<i>Resultado</i>	<i>71</i>
3.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4	CONCLUSÃO	81
4.1	RESPOSTA AO PROBLEMA COLOCADO	81

4.2 OBJETIVOS PROPOSTOS/RESULTADOS ALCANÇADOS.....	82
4.3 RESULTADOS ALCANÇADOS EM CADA PONTO DOS CAPÍTULOS ANTERIORES	83
4.4 CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DA TEMÁTICA.....	84
4.5 CONSTRANGIMENTOS DO PROCESSO	85
4.6 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processo corrente de projeto (<i>workflow</i>) considerado.....	4
Figura 2 - Proposta de <i>workflow</i> de projeto.....	4
Figura 3 - Combinação " <i>social housing</i> " AND " <i>optimization</i> " AND " <i>BIM</i> " OR " <i>building information modeling</i> " AND " <i>prefabrication</i> " OR " <i>modular construction</i> " AND " <i>parametric</i> ".....	10
Figura 4 - Combinação " <i>social housing</i> " AND " <i>optimization</i> ".....	11
Figura 5 - Combinação " <i>social housing</i> " AND " <i>BIM</i> " OR " <i>building information modeling</i> ".....	12
Figura 6 - Combinação " <i>social housing</i> " AND " <i>prefabrication</i> " OR " <i>modular construction</i> ".....	12
Figura 7 - Combinação " <i>social housing</i> " AND " <i>optimization</i> " AND " <i>BIM</i> " OR " <i>building information modeling</i> " AND " <i>prefabrication</i> " OR " <i>modular construction</i> " AND " <i>parametric</i> " OR " <i>workflow</i> ".....	13
Figura 8 – CM tipo I: painéis 2D de betão em estoque de fábrica da empresa KREAR.....	16
Figura 9 - CM tipo II: modulo 3D fabricado e montado pela empresa Vision Modular no Reino Unido	17
Figura 10 - CM tipo III: processo de construção do projeto híbrido The grange University Hospital	17
Figura 11 – Comparação do tempo de construção entre construção modular e construção tradicional - Fonte: <i>Modular construction: From projects to products</i> (McKinsey & Company Book, 2019).....	18
Figura 12 - Modern construction methods: introduction to the MMC definition framework - from: RIBA	24
Figura 13 – Projeto The grange University Hospital Foto: www.michaelwhitestone.co.uk	26
Figura 14 – Projeto Q2 King's Cross Sports Hall Foto: John Sturrock and Nicholas Doddik	28
Figura 15 - Fluxograma do plano experimental Fonte: Autora.....	35
Figura 16 - Diagrama conceitual da interoperabilidade entre ferramentas digitais no ambiente Rhino Inside Revit Fonte: Autora	36
Figura 17 - Etapa 1 do plano experimental Fonte: Autora	41
Figura 18 - Perspetiva da "Casa Catavento" proposta para habitações unifamiliares impressas Fonte: Autora	42
Figura 19 - Tipologia módulo standard Fonte: Autora.....	43
Figura 20 - Variação tipológica evolutiva Fonte: Autora.....	43
Figura 21 - Perspetiva explodida das soluções construtivas adotadas Fonte: Autora	44
Figura 22 - Montagem de <i>shelters</i> em fábrica Fonte: Autora.....	45
Figura 23 - Dimensões máximas para painéis Fonte: Autora	46
Figura 24 - Composição da Fachada 01, propriedades de tipo e tabela de cálculo do custo da materialidade Fonte: Autora	47
Figura 25 - Custo total em € da Fachada 01 Fonte: Autora	49
Figura 26 - Etapa 2 do plano de ação experimental Fonte: Autora	51
Figura 27 - Diagrama da composição da fórmula de custo Fonte: Autora.....	52
Figura 28 - Percurso mínimo necessário Fonte: Autora.....	54

Figura 29 - Percurso mínimo considerando a transportadora LASO como ponto de partida e destino final Fonte: Autora	55
Figura 30 - Exemplo de auto grua	57
Figura 31 – Diagrama do passo-a-passo da construção do algoritmo no Grasshopper	59
Figura 32 - Passo 1: construção da geometria base	60
Figura 33 - Passo 1a: criação da geometria inicial das fachadas de 12m	60
Figura 34 - passo 1b: Randomização das fachadas de 12m.....	61
Figura 35 - passo 1c: Construção da geometria final	62
Figura 36 - Passo 1d: criação da geometria inicial das fachadas de 11m	62
Figura 37 - Passo 1e: randomização das fachadas de 11m.....	63
Figura 38 - Passo 1f: construção da geometria final das fachadas de 11m	63
Figura 39 - Passo 2a: construção da geometria no Revit das fachadas de 12m	64
Figura 40 - Passo 2b: construção da geometria no Revit das fachadas de 11m	64
Figura 41 - Passo 3a: montagem (montagem e logística) e Passo 3b: fabrico (materialidade e mão de obra)	65
Figura 42 - Passo 3c e 4: custo total e Galápagos	66
Figura 43 - Resultado do teste 1 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos.....	66
Figura 44 - Resultado do teste 2 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos.....	67
Figura 45 - Resultado do teste 3 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos.....	67
Figura 46 - Geometria do primeiro teste à esquerda e geometria do segundo teste à direita	69
Figura 47 - Etapa 3 do plano de ação experimental Fonte: Autora	70
Figura 48 - Fachada 01 e fachada 02 sucessivamente Fonte: Autora	71
Figura 49 - Custo total da materialidade no Revit e no Grasshopper Fonte: Autora.....	72
Figura 50 - Composição da Fachada 02 - tabela de cálculo do custo da materialidade Fonte: Autora.....	72
Figura 51 - <i>Workflow</i> Rhino Inside Revit Fonte: Autora.....	73
Figura 52 - Proporção recorrente entre custos de produção, transporte e montagem em orçamentações de projetos da empresa KREAR	75
Figura 53 - Gráfico da proporção de custos da produção, logística e montagem em relação ao custo global do caso de estudo proposto	75
Figura 54 - Gráfico da proporção de custos que compõem o custo global do caso de estudo proposto	76
Figura 55 - Gráfico dos componentes de custo em cada teste realizado	77
Figura 56 - Gráfico da proporção de custos de fabrico e de montagem no custo global do caso de estudo proposto.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Combinação de Palavras-Chave.....	7
Tabela 2 - Resultado numérico das pesquisas realizadas nos bancos de dados considerados	8
Tabela 3 - Artigos selecionados para elaboração do primeiro capítulo	9
Tabela 4 - Artigos selecionados para a pesquisa	14
Tabela 5 – Aplicação do método InOrdinato nos artigos selecionados para a pesquisa	15
Tabela 6 - Rendimento de produção	56
Tabela 7 - Preços totais por piso em escala adimensional	68
Tabela 8 - Preço total e economia por piso: comparação entre soluções manuais e soluções do galapagos	68
Tabela 9 - Preço total e economia por piso: comparação entre melhor solução galapagos e solução após aumento de pisos.....	69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

HCC - Habitação a Custos Controlados
PRR - Plano de Recuperação e Resiliência
BIM - Building Information Modeling
CM - Construção Modular
FCSC - Fatores Críticos de Sucesso na Construção
SSG - Sucesso Sustentável Geral
CP - Congelamento de Projeto
REC - Reconhecimento de Economia de Custos
OMC - *Off-site Modular Construction*
NGSF - Necessidades Gerais Sustentáveis Futuras
DfMA - *Design for Manufacture and Assembly*
CDE - *Common Data Environment*
MMC - *Modern Methods of Construction*
RIBA - *Royal Institute of British Architects 2021*
CLT - *Cross-Laminated Timber*
IFC - *Industry Foundation Classes*
DP- Design Paramétrico
FD- Ferramentas Digitais

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A indústria da construção civil é amplamente reconhecida como uma das menos eficientes em comparação a outros setores industriais. Esse desempenho está relacionado a práticas tradicionais de construção, que são dominantes no mercado e apresentam dificuldades em incorporar inovações tecnológicas que poderiam otimizar processos e reduzir desperdícios (Chen 2023). Além disso, o modelo tradicional é altamente dependente de mão de obra, recursos e tempo, resultando em cronogramas extensos e consequentemente impactos ambientais negativos. Segundo dados globais, o setor consome aproximadamente 32% dos recursos naturais disponíveis e é responsável por 40% das emissões de gases de efeito estufa, além de gerar 30% dos resíduos sólidos globais (Saad et al. 2025).

Neste contexto, as limitações produtivas e económicas da construção civil refletem-se diretamente na capacidade de resposta às necessidades habitacionais da população. A baixa produtividade do setor, associada à dependência de métodos construtivos tradicionais e ao aumento dos custos de produção, contribui para restringir a oferta de habitação acessível. A reduzida capacidade de modernização da indústria compromete a sua aptidão para responder à procura habitacional crescente, especialmente no segmento residencial, onde os efeitos da escassez de capacidade produtiva e da inflação dos custos se tornam mais evidentes (Sá 2024; Mark Farmer 2016).

O défice habitacional é um grande problema e as falhas do mercado imobiliário, tanto público quanto privado, somadas aos altos custos de construção dificultam o acesso à habitação, principalmente para famílias de rendas média e baixa. A crise financeira global e a pandemia de Covid-19 agravaram ainda mais esse cenário e nesta conjuntura, a política para habitação a custos controlados (HCC) em Portugal foi marcada pela criação do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) (Sá 2024).

Para contornar esse problema, implementou-se o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) de Portugal, um programa nacional de aplicação de fundos europeus até 2026, com um valor total atualizado de cerca de 22.216 milhões de euros (Sá 2024). Focado em reformas e investimentos, o PRR visa alavancar a recuperação económica e social pós-pandemia, com base em três eixos: Resiliência, Transição Climática e Transição Digital. O PRR passou a estabelecer metas para a construção de habitações até 2026, no entanto, desafios relacionados à burocracia, à escassez de mão de obra qualificada e ao aumento dos custos de materiais tornam o cumprimento dessas metas um objetivo ambicioso (Sá 2024).

Nesse contexto, a industrialização da construção assume um papel estratégico para responder às exigências de produtividade, previsibilidade e redução de custos impostas pela atual conjuntura habitacional. Parte-se do princípio de que, se o projeto fosse articulado com a produção, como acontece na indústria, seria possível otimizar toda a cadeia produtiva, reduzindo desperdícios, retrabalhos e ineficiências decorrentes da fragmentação entre as fases de conceção, fabrico e montagem. Sob essa perspetiva, a industrialização deixa de representar apenas a adoção de componentes pré-fabricados e passa a constituir uma mudança mais ampla, baseada na integração entre projeto, produção e montagem desde as fases iniciais de desenvolvimento. Os princípios do Design for Manufacture and Assembly (DfMA) refletem essa abordagem ao incorporar, ainda na fase de projeto, os requisitos de fabrico e montagem, promovendo maior padronização, previsibilidade, qualidade e eficiência ao longo de todo o processo construtivo (Mark Farmer 2016; Yuan et al. 2018).

A construção modular (CM) por sua vez, pode surgir então como uma alternativa sustentável para contornar o déficit habitacional, pois reduz desperdícios em até 70%, acelera prazos de execução e diminui significativamente o impacto ambiental, quando comparada a métodos convencionais (Ferdous et al. 2019). As tecnologias digitais, em especial o Building Information Modeling (BIM), desempenham papel estratégico nesse processo, ao viabilizar maior controle, compatibilização e racionalização das decisões projetais. Assim, configuram-se como instrumentos fundamentais para a transição de um modelo construtivo tradicional para uma abordagem orientada à industrialização (Yuan et al. 2018).

A CM em conjunto com ferramentas como o BIM – tecnologia que possibilita a criação de modelos digitais que integram informações de todas as fases do projeto, desde a conceção até a fase de construção – pode garantir um controle mais rigoroso dos recursos, facilitando a coordenação entre equipes multidisciplinares e promovendo a redução de erros e “retrabalhos” (Karimimansoob et al. 2024). É importante pontuar que “ferramentas digitais” é um termo genérico utilizado na presente pesquisa para referir a softwares que são comumente utilizados na construção civil, em especial o Rhino 3D e o Revit. Portanto, é possível concluir que a CM aliada ao uso de ferramentas digitais (FD) e em conjunto com a produção, pode contribuir para otimizar o processo de projeto, fabrico e obra e assim representar uma alternativa viável para responder parte das necessidades habitacionais portuguesas.

1.2 PERTINÊNCIA DO ESTUDO

A pertinência deste estudo reside na necessidade de identificar soluções de projeto capazes de responder simultaneamente aos desafios de produtividade da indústria da construção civil e ao crescente défice habitacional em Portugal. O setor da construção caracteriza-se por baixos níveis de eficiência, elevada dependência de mão de obra e recursos, elevados custos de produção e impactos ambientais significativos, fatores que limitam a sua capacidade de satisfazer a procura habitacional, especialmente no segmento da habitação a custos controlados (Sá 2024; Saad et al. 2025).

Num contexto em que o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) estabelece metas ambiciosas para a construção de novas habitações até 2026, torna-se fundamental investigar métodos construtivos que permitam aumentar a produtividade, reduzir prazos de execução e, especialmente, otimizar a utilização de recursos. Neste sentido, a construção modular apresenta-se como uma alternativa promissora, devido à sua capacidade de reduzir desperdícios, melhorar a qualidade construtiva e acelerar os processos de produção (Ferdous et al. 2019).

Adicionalmente, a integração de tecnologias digitais pode potencializar os benefícios da construção modular ao promover um maior controlo dos recursos e redução de erros e retrabalhos (Karimimansoob et al. 2024). Assim, o estudo é pertinente por contribuir para a compreensão do potencial da industrialização da construção associada ao uso de ferramentas digitais, buscando encontrar soluções construtivas mais viáveis economicamente para enfrentar os desafios habitacionais em Portugal.

1.3 PROBLEMA DA PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo compreender se a CM, aliada ao uso de FD, configura-se como alternativa viável para contribuir com a racionalização do processo de projeto voltado ao desenvolvimento de habitações a custos controlados em Portugal. Estudos anteriores apontam a eficácia da integração entre modelagem paramétrica e ambiente BIM em projetos de construção modular (Brasil e Martinez 2022), reforçando a pertinência da abordagem adotada.

A investigação será conduzida por meio da proposição de um fluxo de trabalho específico ou *workflow*, estruturado para apoiar a definição da solução de montagem economicamente acessível, considerando os elementos construtivos disponibilizados pela empresa KREAR. Assim, estrutura-se e aplica-se uma metodologia operacional orientada à otimização paramétrica do projeto.

Nesse contexto, a pesquisa analisa a viabilidade da CM em Portugal, examinando seu potencial para atender à crescente demanda por habitações acessíveis, bem como identifica possíveis entraves técnicos e processuais à sua adoção. Ainda, contribui-se para o desenvolvimento de projetos de CM, explorando de que maneiras ferramentas paramétricas podem ser articuladas para apoiar decisões projetais fundamentadas em critérios de desempenho e custo.

A proposta metodológica fundamenta-se na integração entre Revit e Grasshopper, utilizando o ambiente Rhino Inside Revit, associada ao uso do plugin Galapagos como ferramenta de otimização. Por meio desse arranjo, busca-se estruturar um workflow capaz de testar variações de montagem e identificar, com base em parâmetros previamente definidos, a configuração mais acessível sob o ponto de vista econômico. Neste contexto o Revit é utilizado inicialmente como referência comparativa, representando o processo tradicional de concepção, que começa e termina no próprio software.



Figura 1 - Processo corrente de projeto (*workflow*) considerado

O *workflow* proposto acrescenta ao processo tradicional uma etapa intermédia de tomada de decisão baseada em dados. Após a otimização no Grasshopper, a solução pode retornar ao Revit para continuidade do desenvolvimento BIM. O objetivo é que este workflow possa ser reutilizado por outros projetistas e aplicado a diferentes contextos. Como o Revit é uma das plataformas BIM mais utilizadas na prática profissional, esta integração permite que as soluções desenvolvidas e otimizadas no Grasshopper sejam facilmente incorporadas ao fluxo de trabalho convencional dos projetistas.

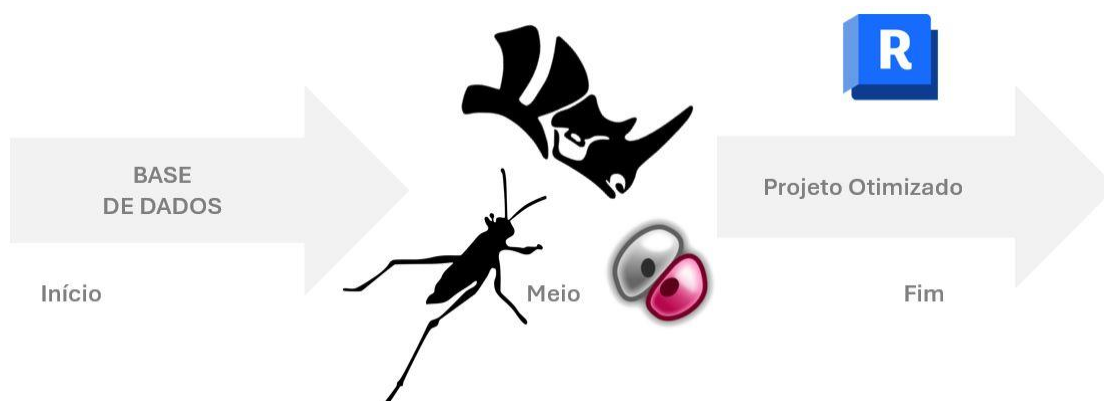


Figura 2 - Proposta de *workflow* de projeto

Neste âmbito, também será testada a pertinência de uma abordagem que considera a interoperabilidade entre softwares como parte integrante do processo de otimização. A interoperabilidade corresponde à capacidade de diferentes sistemas computacionais partilharem, interpretar e reutilizarem informações de forma consistente. Essa capacidade permite a integração entre plataformas de modelagem paramétrica, análise, planeamento e gestão, promovendo um fluxo contínuo de informação e reduzindo perdas e ineficiências decorrentes da fragmentação dos processos de projeto e construção (Lu et al. 2017; Brasil e Martinez 2022).

1.4 OBJETIVOS

Busca-se de forma geral compreender se é possível otimizar processos de design a partir da utilização de ferramentas digitais no contexto da CM com recurso à metodologia DfMA, avaliando a relevância dessa abordagem no cenário de habitação a custos controlados. O propósito central do estudo consiste em definir um fluxo de trabalho paramétrico que possa auxiliar arquitetos e projetistas na tomada de decisão. Procura-se validar as hipóteses levantadas pela pesquisa através da análise dos resultados de um caso de estudo prático voltado para a habitação a custos controlados. Por fim, pretende-se verificar o quanto esta abordagem pode impactar a otimização de custos ainda em fase de conceção projectual.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa é qualitativa com base em estudos teóricos e exploratória, propondo a exploração do tema proposto e a sua aplicação. Se trata de um caso de estudo com empresa e a recolha de dados será baseada em análise documental de estudos prévios relevantes para a pesquisa. As ferramentas utilizadas serão o Zotero e o VOSviewer para realizar e organizar a pesquisa científica, e os softwares Revit 2025, Rhino 8 e Grasshopper para realizar o caso de estudo apresentado no capítulo 3.

1.6 RESULTADOS ESPERADOS

- Compreender se é possível otimizar a redução de custos no caso da construção modular e se isso é relevante para o contexto de habitação social;
- Definir um fluxo de trabalho ou *workflow* paramétrico para o sistema de construção modular KREAR;
- Verificar o potencial da parametrização e da otimização computacional na economia de custos para Habitações a Custos Controlados.
- Testar a pertinência de uma abordagem metodológica que considera a interoperabilidade entre softwares como parte integrante do processo de otimização.

2

ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento do estado da arte da pesquisa, a metodologia bibliométrica utilizada e os resultados obtidos por meio da sua aplicação. Também se demonstra o processo para definição as palavras-chaves consideradas na revisão bibliométrica e as conclusões a partir dos resultados obtidos ao pesquisar por esses termos nos bancos de dados considerados.

2.2 PALAVRAS-CHAVE

Para a revisão da literatura foi utilizada a metodologia de revisão sistemática considerando os seguintes bancos de dados: Scopus, Google Scholar e Web of Science. Para identificar as palavras-chave foi realizada uma pesquisa prévia nos bancos de dados mencionados, buscando abordar quatro áreas consideradas principais na pesquisa: construção modular; habitação a custos controlados; design paramétrico e BIM. Os critérios de inclusão e exclusão variaram conforme a plataforma em questão, com exceção dos critérios “data” – que abrangeu todas as pesquisas realizadas nos últimos cinco anos - e “relevância”. As palavras-chaves utilizadas inicialmente para localizar pesquisas pertinentes ao tema proposto estão expostas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Combinação de Palavras-Chave

COMBINAÇÃO KEYWORDS	
1	modular construction AND social housing
2	modular construction OR social housing OR BIM OR building information modeling
3	modular construction AND social housing OR BIM OR building information modeling AND parametric
4	modular construction AND social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric OR workflow
5	social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric OR workflow
6	social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric
7	social housing AND BIM OR building information modeling
8	Habitação a custos controlados AND Portugal
9	Social Housing AND Portugal

2.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Dentre os resultados obtidos, que variaram muito conforme o banco de dados utilizado, foram considerados somente os 50 primeiros após ser verificado que, devido a utilização do filtro de pesquisa “relevância”, os resultados obtidos a partir desta posição se encontravam majoritariamente fora do campo da construção civil e arquitetura. Os artigos cujo acesso estava indisponível, por estarem hospedados em plataformas pagas, também foram desconsiderados. O resultado dessas pesquisas pode ser conferido na tabela 2. É importante pontuar que o filtro de relevância aplicado nos bancos de dados mede principalmente a aderência do conteúdo indexado à estratégia de busca, realizada a partir da combinação entre as palavras-chave citadas anteriormente.

Tabela 2 - Resultado numérico das pesquisas realizadas nos bancos de dados considerados

COMBINAÇÃO KEYWORDS	SCOPUS			GOOGLE SCHOLAR			WEB OF SCIENCE		
	ID KEYWORD	DATA	RESULTADOS	ID KEYWORD	DATA	RESULTADOS	ID KEYWORD	DATA	RESULTADOS
1 modular construction AND social housing	SCOPUS_01	11/01/2025	875	GOOGLE_01	08/01/2025	24	WOS_01	08/01/2025	84
2 modular construction OR social housing OR BIM OR building information modeling	SCOPUS_02	11/01/2025	233.56	GOOGLE_02	08/01/2025	58	WOS_02	08/01/2025	257.303
3 parametric	SCOPUS_03	11/01/2025	26.947	GOOGLE_03	08/01/2025	10	WOS_03	08/01/2025	25.373
4 modular construction AND social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric OR workflow	SCOPUS_04	08/01/2025	21	GOOGLE_04	08/01/2025	0	WOS_04	08/01/2025	90.539
5 social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric OR workflow	SCOPUS_05	08/01/2025	11	GOOGLE_05	09/01/2025	3	WOS_05	08/01/2025	90.631
6 social housing AND BIM OR building information modeling AND parametric	SCOPUS_06	08/01/2025	9	GOOGLE_06	09/01/2025	5	WOS_06	08/01/2025	2.478
7 social housing AND BIM OR building information modeling	SCOPUS_07	08/01/2025	81	GOOGLE_07	09/01/2025	14	WOS_07	08/01/2025	167.661
8 Habitação a custos controlados AND Portugal	SCOPUS_08	09/01/2025	0	GOOGLE_08	09/01/2025	3	WOS_08	09/01/2025	0
9 Social Housing AND Portugal	SCOPUS_09	09/01/2025	88	GOOGLE_09	09/01/2025	69	WOS_09	09/01/2025	14

Após identificar as pesquisas mais relevantes publicadas nos últimos 5 anos e que continham pelo menos uma das palavras-chave mencionadas ao longo do documento, foi realizada uma seleção manual dos artigos através de uma breve leitura do “abstract” ou resumo de cada um. Todas as pesquisas resultantes dessa seleção foram organizadas em um documento que identifica cada uma delas com uma “ID”. A “ID” referencia a pesquisa conforme a base de dados onde foi encontrada, a palavra-chave que foi utilizada para encontrá-la e em que posição ela está quanto sua relevância.

Foram analisadas 189 referências no total, das quais 11 foram selecionadas para compor o primeiro capítulo da tese. As pesquisas selecionadas se encontram na tabela 3, onde é possível verificar a “ID” de cada título e um resumo de sua contribuição para o tema. Com o avanço do estado da arte, novos artigos foram incorporados à revisão, permitindo aprofundar os temas emergentes e consolidar a fundamentação teórica da investigação. Este processo contínuo de atualização contribuiu para o refinamento dos conceitos analisados e para o desenvolvimentos dos capítulos subsequentes da pesquisa.

Tabela 3 - Artigos selecionados para elaboração do primeiro capítulo

ID KEYWORD	TÍTULO	CONTRIBUIÇÕES
1 WOS_01_001	Assembling an innovative social housing project in Melbourne: mapping the potential for social innovation	Exemplo prático da aplicação da construção modular para habitação social em Melbourne.
2 SCOPUS_01_002	Offsite modular construction adoption in developing countries: Partial least square approach for sustainable future	Aborda a construção modular como prática sustentável: relationship identification between Offsite Modular Adoption Barriers (OMABs) and overall sustainable future needs (OSFN), which has not been researched comprehensively in the literature.
3 SCOPUS_02_005	Modelling the role of modular construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects	Construção modular e sustentabilidade: Modular construction (MC) is regarded as a greener and more sustainable building method and is required for assessing the sustainability of a project.
4 SCOPUS_02_008	Advantages and barriers of modular construction method in constructing buildings	Aborda vantagens e desvantagens da construção modular no geral.
5 SCOPUS_03_001	New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review	Contribuição para a introdução ao tema.
6 GOOGLE_02_014	AUTONOMOUS SOLUTIONS FOR DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODULAR STRUCTURES	História da construção modular.
7 GOOGLE_02_018	Integration of BIM and modular construction: advantages, barriers, and implementation strategies	Aborda a integração entre BIM e construção modular mais especificamente.
8 GOOGLE_07_002	"Application of BIM in Energy Conservation in Low-Cost Housing in Case of Study in Dallas Independent School Residential District, Texas "	Exemplo prático da aplicação da construção modular em Dallas, Texas.
9 GOOGLE_07_004	Investment in Housing Construction: Current Trends and Digital Technologies	Aborda as vantagens da utilização de BIM no caso da construção habitacional.
10 GOOGLE_08_001	Arrendamento acessível-Algumas ações para viabilizar a construção de novos edifícios	Contribuição para contextualizar a habitação a custos controlados em Portugal e justificar o uso de construção modular nesse contexto.
11 GOOGLE_09_004	Por uma Habitação para todos. Das lições do legado industrial à produção de princípios para a circunstância contemporânea	Aborda a crise da habitação e aponta a prefabricação como aliada na resolução desse problema.

A revisão da literatura demonstrou numericamente que embora a relação entre construção modular e ferramentas digitais seja um tema amplamente abordado, a relação dessas tecnologias com o segmento de habitações a custos controlados, ainda é pouco explorada. Devido a este fato, a estratégia de pesquisa apresentada anteriormente foi revisada e novas pesquisas foram realizadas considerando “*social housing*” como a palavra-chave central em vez de “*modular construction*”.

A figura 1 foi gerada pelo aplicativo VosViewer a partir da combinação das palavras “*social housing*” AND “*optimization*” AND “*BIM*” OR “*building information modeling*” AND “*prefabrication*” OR “*modular construction*” AND “*parametric*”. Como é possível observar, nesse contexto o termo “*social housing*” sequer aparece como relevante.

A seguir são apresentadas mais imagens geradas pelo aplicativo VosViewer que demonstram o quanto a conexão entre “*social housing*”, “*optimization*”, “*BIM*” e “*modular construction*” ou “*prefabrication*” ainda é pouco explorada. A base de dados utilizadas para o Vosviewer foi o Web of Science, com resultados organizados a partir da relevância.

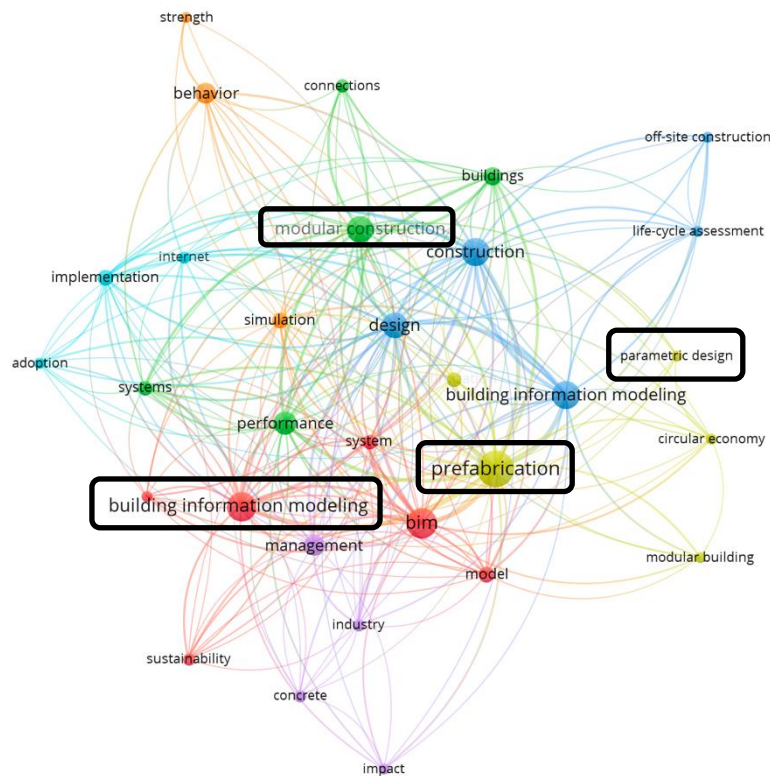


Figura 3 - Combinação "social housing" AND "optimization" AND "BIM" OR "building information modeling" AND "prefabrication" OR "modular construction" AND "parametric"

Buscando identificar as relações entre “social housing” e outros campos de estudo pertinentes para a pesquisa, foram realizadas novas combinações. A primeira foi “social housing” AND “optimization”, combinação que, como é demonstrado na figura 2, sequer incluem “BIM” e “modular construction” ou “prefabrication” como temas relacionados.

É possível perceber ao analisar os artigos selecionados a partir dessa combinação de palavras-chave - “social housing” AND “optimization” – demonstrada na figura 2, que a grande maioria dos artigos encontrados a partir do Web of Science e do Scopus relacionam diretamente otimização com eficiência energética, por vezes a otimização dos processos de projetos é sugerida, mas sempre dentro deste contexto de análise. Poucos foram os artigos que relacionaram otimização com *workflow*, ou processos de projeto, que seriam da área de interesse explorada nesta tese.

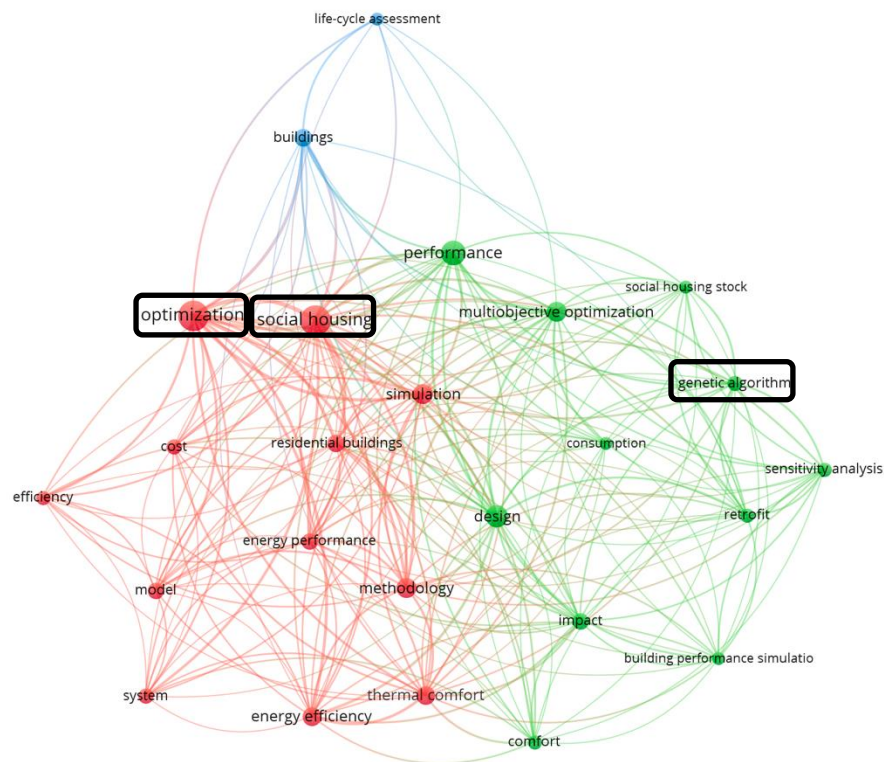


Figura 4 - Combinação "social housing" AND "optimization"

Esse resultado induziu ao experimento das seguintes combinações:

- "social housing" AND "BIM" OR "building information modeling"
- "social housing" AND "prefabrication" OR "modular construction"

Onde finalmente foram obtidos resultados que incluíam o termo "social housing", como é possível observar nas figuras 3 e 4 respectivamente. Na figura 4 em especial, o termo social housing aparece, mas isolado em relação as outras palavras-chave e com poucas conexões. Isto demonstra que o tema ainda está pouco conectado aos outros termos considerados.

Em resumo, a combinação entre os termos abordados na presente pesquisa, que são: "social housing" AND "optimization" AND "BIM" OR "building information modeling" AND "prefabrication" OR "modular construction" AND "parametric" OR "workflow" ainda é incipiente na literatura o que reforça a pertinência do estudo sugerido. Este fator demonstra que a relação de interoperabilidade proposta que inclui o Rhino Inside Revit ainda é pouco explorada, fato que é compreensível se considerarmos que a versão oficial do Rhino inside revit foi lançada somente em 2021.

Tabela 4 - Artigos seleccionados para a pesquisa

	ID KEYWORD	TÍTULO
1	WOS_01_003	Connecting the Portuguese system of evolutive housing with building information modeling: From analogical to digital methods
2	WOS_01_005	Evaluating Social Housing Retrofit Options to Support Clients' Decision MakingSIMPLER BIM Protocol
3	WOS_01_007	Social Housing Life Cycle Management: Workflow for the Enhancement of Digital Management Based on Building Information Modelling (BIM)
4	WOS_01_008	Framework for Sustainable Low-Income Housing Projects Using Building Information Modeling
5	WOS_01_011	Using Building Information Modelling to Manage Client Requirements in Social Housing Projects
6	WOS_01_014	Measuring the value and cost of BIM use—an empirical lesson learned from Taiwan's social housing projects
7	WOS_01_016	FUNCTIONALITY AND FURNITURE OF THE HOUSING: CONTRIBUTIONS TO SOCIAL HOUSING DESIGN
8	WOS_01_018	Coding Engines in Participatory Social Housing Design-A Case to Revisit Pattern Languages
9	WOS_01_019	Building information modelling to cut disruption in housing retrofit
10	WOS_01_020	INTEGRATED MODEL SUPPORTING ENVIRONMENTAL PERFORMANCE SIMULATIONS IN THE EARLY STAGES OF BUILDING DESIGN
11	WOS_01_023	Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modelling
12	WOS_02_002	A Novel Offsite Construction Method for Social Housing in Emerging Economies for Low Cost and Reduced Environmental Impact
13	WOS_02_003	A Framework to Adopt Modern Methods of Construction in Social Housing Projects in Egypt
14	WOS_02_005	Multi-objective optimization of the level of prefabrication in construction projects
15	WOS_02_008	Study of the validity of the constructive system LAD-MA for the self-help housing of incremental housing
16	WOS_03_034	A Model for Sustainable Site Layout Design of Social Housing with Pareto Genetic Algorithm: SSPM
17	WOS_03_039	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
18	WOS_01_013	PROPOSAL FOR THE IMPLEMENTATION OF THE BIM METHODOLOGY IN AN CLASSROOM EXPERIENCE FOCUSED ON BUILDING SUSTAINABILITY
19	WOS_02_001	The epigone of El Modulor: The yellow series in Rafael Leoz's investigations
20	WOS_03_023	Passive strategies towards energy efficient social housing: A parametric case study and decision-making framework in the Mexican tropical climate
21	WOS_03_026	Mitigation of climate change in Mediterranean existing social dwellings through numerical optimization of building stock models
22	WOS_03_027	A Decision Making Tool for a Comprehensive Evaluation of Building Retrofitting Actions at the Regional Scale
23	WOS_08_005	Effect of Embodied Energy on Cost-Effectiveness of a Prefabricated Modular Solution on Renovation Scenarios in Social Housing in Porto, Portugal
24	SCOPUS_01_005	Implementing last planner in the context of social housing retrofit
25	SCOPUS_01_006	Evaluating social housing retrofit options to support clients' decision Making-SIMPLER BIM protocol
26	SCOPUS_01_016	Using BIM for modeling client requirements for low-income housing
27	SCOPUS_01_026	Measuring the value and cost of BIM use—an empirical lesson learned from Taiwan's social housing projects
28	SCOPUS_01_027	Potential for Social Housing Mass Customization in Brazil through the Integration between BIM and Algorithmic-Parametric Modeling
29	SCOPUS_01_030	What comes first when implementing data templates? Refurbishment case study
30	SCOPUS_01_035	Evolutive Dataset for Social Housing Design Projects through Artificial Intelligence: From pixel to BIM through deep learning
31	SCOPUS_01_037	Digitalisation for circular social housing practices
32	SCOPUS_02_012	An evolution of sustainable house construction technologies
33	SCOPUS_02_014	Technological and functional optimization of a modular construction system for flexible and adaptable multi-family housing
34	SCOPUS_02_020	Modular Construction for Emergency Situation: A Design Methodology for the Building Envelope
35	SCOPUS_02_027	FILLING THE GAPS: MODIFYING MODULAR HOUSING IN CHILE
36	SCOPUS_08_024	Social housing in Portugal and in the Municipality of São Paulo: Comparison of space standards
37	SCOPUS_08_029	Social housing: Lisbon/Porto alegre, Time, space and popular participation; [Viviendas sociales: Lisboa/Porto alegre. Tiempo, espacio y participación popular
38	SCOPUS_08_007	Thermal and Natural Light Comfort Analysis of Bouça Social Housing Development in Porto, Portugal
39	SCOPUS_08_009	Precast Concrete Building Construction and Envelope Thermal Behavior: A Case Study on Portuguese Public Social Housing
40	SCOPUS_08_014	Design modular tools for social housing: The case of the complex in rua da seara by João Álvaro rocha
41	SCOPUS_02_013	EXPERIENCE IN USING MODULAR SOCIAL HOUSING
42	GOOGLE_02_014	AUTONOMOUS SOLUTIONS FOR DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODULAR STRUCTURES
43	GOOGLE_02_018	Integration of BIM and modular construction: advantages, barriers, and implementation strategies
44	GOOGLE_07_002	"Application of BIM in Energy Conservation in Low-Cost Housing in Case of Study in Dallas Independent School Residential District, Texas"
45	GOOGLE_07_004	Investment in Housing Construction: Current Trends and Digital Technologies
46	GOOGLE_08_001	Arrendamento acessível-Algumas ações para viabilizar a construção de novos edifícios
47	GOOGLE_09_004	Por uma Habitação para todos. Das lições do legado industrial à produção de princípios para a circunstância contemporânea
48	Pesquisa Narrativa	Offsite modular construction adoption in developing countries: Partial least square approach for sustainable future
49	Pesquisa Narrativa	Modelling the role of modular construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects
50	Pesquisa Narrativa	Advantages and barriers of modular construction method in constructing buildings
51	Pesquisa Narrativa	New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings—A state-of-the-art review

Por fim, foi realizado o Método InOrdinato para selecionar quais artigos dentre os considerados acima são mais pertinentes para o trabalho conforme sua relevância científica. Após a seleção, os artigos escolhidos foram analisados e utilizados para a elaboração da presente pesquisa.

Tabela 5 – Aplicação do método InOrdinato nos artigos selecionados para a pesquisa

	ID KEYWORD	TÍTULO	Fator de Impacto da Revista	Citações	Ano	Alfa	Ano atual	InOrdinato
51	Pesquisa Narrativa	New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review	5,6	469	2019	8	2025	501,0
49	Pesquisa Narrativa	Modelling the role of modular construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects	6,7	34	2023	8	2025	98,0
11	WOS_01_023	Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modelling	2,7	65	2018	8	2025	89,0
44	GOOGLE_07_002	*Application of BIM in Energy Conservation in Low-Cost Housing in Case of Study in Dallas Independent School Residential District, Texas *	0	16	2024	8	2025	88,0
48	Pesquisa Narrativa	Offsite modular construction adoption in developing countries: Partial least square approach for sustainable future	6	0	2025	8	2025	80,0
20	WOS_03_023	Passive strategies towards energy efficient social housing: A parametric case study and decision-making framework in the Mexican tropical climate	6,7	2	2024	8	2025	74,0
14	WOS_02_005	Multi-objective optimization of the level of prefabrication in construction projects	1,5	1	2024	8	2025	73,0
13	WOS_02_003	A Framework to Adopt Modern Methods of Construction in Social Housing Projects in Egypt	3,3	0	2024	8	2025	72,0
45	GOOGLE_07_004	Investment in Housing Construction: Current Trends and Digital Technologies	1,8	0	2024	8	2025	72,0
42	GOOGLE_02_014	AUTONOMOUS SOLUTIONS FOR DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODULAR STRUCTURES	0	0	2024	8	2025	72,0
50	Pesquisa Narrativa	Advantages and barriers of modular construction method in constructing buildings	1	5	2023	8	2025	69,0
21	WOS_03_026	Mitigation of climate change in Mediterranean existing social dwellings through numerical optimization of building stock models	6,6	12	2022	8	2025	68,0
12	WOS_02_002	A Novel Offsite Construction Method for Social Housing in Emerging Economies for Low Cost and Reduced Environmental Impact	3,3	3	2023	8	2025	67,0
17	WOS_03_039	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	3,3	11	2022	8	2025	67,0
27	SCOPUS_01_026	Measuring the value and cost of BIM use—an empirical lesson learned from Taiwan's social housing projects	1,1	1	2023	8	2025	65,0
6	WOS_01_014	Measuring the value and cost of BIM use—an empirical lesson learned from Taiwan's social housing projects	1,1	0	2023	8	2025	64,0
3	WOS_01_007	Social Housing Life Cycle Management: Workflow for the Enhancement of Digital Management Based on Building Information Modelling (BIM)	3,3	5	2022	8	2025	61,0
5	WOS_01_011	Using Building Information Modelling to Manage Client Requirements in Social Housing Projects	3,3	17	2020	8	2025	57,0
1	WOS_01_003	methods	1,6	1	2022	8	2025	57,0
31	SCOPUS_01_037	Digitalisation for circular social housing practices	0	0	2022	8	2025	56,0
34	SCOPUS_02_020	Modular Construction for Emergency Situation: A Design Methodology for the Building Envelope	0,4	3	2021	8	2025	51,0
8	WOS_01_016	Coding Engines in Participatory Social Housing Design-A Case to Revisit Pattern Languages	3,3	2	2021	8	2025	50,0
39	SCOPUS_08_009	Precast Concrete Building Construction and Envelope Thermal Behavior: A Case Study on Portuguese Public Social Housing	2,03	2	2021	8	2025	50,0
23	WOS_08_005	Effect of Embodied Energy on Cost-Effectiveness of a Prefabricated Modular Solution on Renovation Scenarios in Social Housing in Porto, Portugal	3,3	9	2020	8	2025	49,0
2	WOS_01_005	Evaluating Social Housing Retrofit Options to Support Clients' Decision MakingSIMPLER BIM Protocol	3,3	13	2019	8	2025	45,0
25	SCOPUS_01_006	Evaluating social housing retrofit options to support clients' decision Making-SIMPLER BIM protocol	3,3	12	2019	8	2025	44,0
18	WOS_01_013	PROPOSAL FOR THE IMPLEMENTATION OF THE BIM METHODOLOGY IN AN CLASSROOM EXPERIENCE FOCUSED ON BUILDING SUSTAINABILITY	0,3	4	2020	8	2025	44,0
15	WOS_02_008	Study of the validity of the constructive system LAD-MA for the self-help housing of incremental housing	0,4	3	2020	8	2025	43,0
41	SCOPUS_02_013	EXPERIENCE IN USING MODULAR SOCIAL HOUSING	0	0	2020	8	2025	40,0
7	WOS_01_016	FUNCTIONALITY AND FURNITURE OF THE HOUSING: CONTRIBUTIONS TO SOCIAL HOUSING DESIGN	0,1	0	2019	8	2025	32,0
4	WOS_01_008	Framework for Sustainable Low-Income Housing Projects Using Building Information Modeling	6	23	2016	8	2025	31,0
22	WOS_03_027	A Decision Making Tool for a Comprehensive Evaluation of Building Retrofitting Actions at the Regional Scale	3,3	19	2016	8	2025	27,0
9	WOS_01_019	Building information modelling to cut disruption in housing retrofit	1,5	10	2017	8	2025	26,0
37	SCOPUS_08_029	Social housing: Lisbon/Porto alegre. Time, space and popular participation; [Viviendas sociales: Lisboa/Porto alegre. Tiempo, espacio y participación popular	0,97	0	2016	8	2025	8,0
33	SCOPUS_02_014	Technological and functional optimization of a modular construction system for flexible and adaptable multi-family housing	0	3	2013	8	2025	-13,0
36	SCOPUS_08_024	Social housing in Portugal and in the Municipality of São Paulo: Comparison of space standards	0	1	2011	8	2025	-31,0
10	WOS_01_020	INTEGRATED MODEL SUPPORTING ENVIRONMENTAL PERFORMANCE SIMULATIONS IN THE EARLY STAGES OF BUILDING DESIGN						
16	WOS_03_034	A Model for Sustainable Site Layout Design of Social Housing with Pareto Genetic Algorithm: SSPM						
19	WOS_02_001	The epigone of El Modulor: The yellow series in Rafael Leoz's investigations						
24	SCOPUS_01_005	Implementing last planner in the context of social housing retrofit						
26	SCOPUS_01_016	Using BIM for modeling client requirements for low-income housing						
28	SCOPUS_01_027	Potential for Social Housing Mass Customization in Brazil through the Integration between BIM and Algorithmic-Parametric Modeling						
29	SCOPUS_01_030	What comes first when implementing data templates? Refurbishment case study						
30	SCOPUS_01_035	Evolutive Dataset for Social Housing Design Projects through Artificial Intelligence: From pixel to BIM through deep learning						
32	SCOPUS_02_012	An evolution of sustainable house construction technologies						
35	SCOPUS_02_027	FILLING THE GAPS: MODIFYING MODULAR HOUSING IN CHILE						
38	SCOPUS_08_007	Thermal and Natural Light Comfort Analysis of Bouça Social Housing Development in Porto, Portugal						
40	SCOPUS_08_014	Design modular tools for social housing: The case of the complex in rua da seara by João Álvaro rocha						
43	GOOGLE_02_018	Integration of BIM and modular construction: advantages, barriers, and implementation strategies						
46	GOOGLE_08_001	Arrendamento acessível-Algumas ações para viabilizar a construção de novos edifícios						
47	GOOGLE_09_004	Por uma Habitação para todos. Das lições do legado industrial à produção de princípios para a circunstância contemporânea						

Os artigos que não possuem informação para aplicação do método InOrdinato são trabalhos de mestrado ou de conferências publicadas nas bases de dados consideradas na pesquisa bibliométrica. Portanto, alguns foram considerados ao longo da pesquisa, mas de maneira secundária em relação aos artigos de maior relevância.

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desperdício de material consequente dos métodos de construção tradicional é insustentável se pretendemos considerar abordagens mais sustentáveis no setor da construção (Ferdous et al. 2019). A construção *off-site* vem como uma solução viável para reduzir desperdícios e acelerar o processo construtivo como um todo (Ferdous et al. 2019).

Diversos pesquisadores indicam que a CM pode reduzir o tempo de construção de 50% a 60% quando comparada aos métodos de construção tradicional (*on-site*), minimizando o custo final do projeto (Ferdous et al. 2019). Os materiais utilizados na construção modular geralmente são os mesmos utilizados nos métodos tradicionais de construção, entretanto eles oferecem uma qualidade superior já que sua produção é realizada em ambiente controlado, dentro de fábricas (Ferdous et al. 2019).

A definição de edificações modulares, conforme citado por Ferdous et al. (2019), consiste em componentes e unidades - chamados módulos - fabricados "*off-site*", ou seja, dentro das indústrias para em seguida serem transportados e montados no local. Esta prática existe em oposição as construções *on-site* que tradicionalmente acontecem inteiramente dentro do canteiro de obras. Em termos gerais, de acordo com Vitanova et al. (2024) a construção modular pode ser categorizada em três tipos principais:

- Tipo I: Painéis 2D ou construção plana – esses painéis são usados principalmente para paredes e são mais baratos para transportar do local de produção (fábrica) para o local de montagem (obra).



Figura 8 – CM tipo I: painéis 2D de betão em estoque de fábrica da empresa KREAR

- Tipo II: Módulos 3D ou unidades volumétricas – podem ser partes de uma sala ou salas inteiras.



Figura 9 - CM tipo II: modulo 3D fabricado e montado pela empresa Vision Modular no Reino Unido

- Tipo III: Construção híbrida – este é um uso misto de elementos lineares, painéis e módulos para criar um sistema construtivo misto.



Figura 10 - CM tipo III: processo de construção do projeto híbrido The grange University Hospital

Neste trabalho, o tipo de construção modular a ser utilizado é o tipo I, tendo como premissa os módulos pré-fabricados de concreto armado existentes da empresa KREAR. Este material apresenta vantagens como a elevada capacidade de suportar cargas, a alta disponibilidade e benefícios econômicos que os tornam adequados para a produção em série e para a construção de edifícios altos, com sete pavimentos ou mais (Ferdous et al. 2019). Na figura 6 é apresentado um gráfico comparativo entre o tempo de execução de uma obra utilizando métodos tradicionais de construção e utilizando construção modular.

A figura 6 indica que apesar do tempo para realização do projeto ser praticamente o mesmo ou até maior que o tempo para planejamento de construções tradicionais, é na fase de construção que a construção modular apresenta grande vantagem quando comparada aos métodos tradicionais, sendo de 20% a 50% mais rápida, além de evitar o retrabalho do que foi planejado na fase projectual. Evidenciando que ainda há espaço para trabalhar a otimização da fase projectual e aumentar ainda mais a vantagem da utilização da construção modular em relação aos métodos construtivos tradicionais.

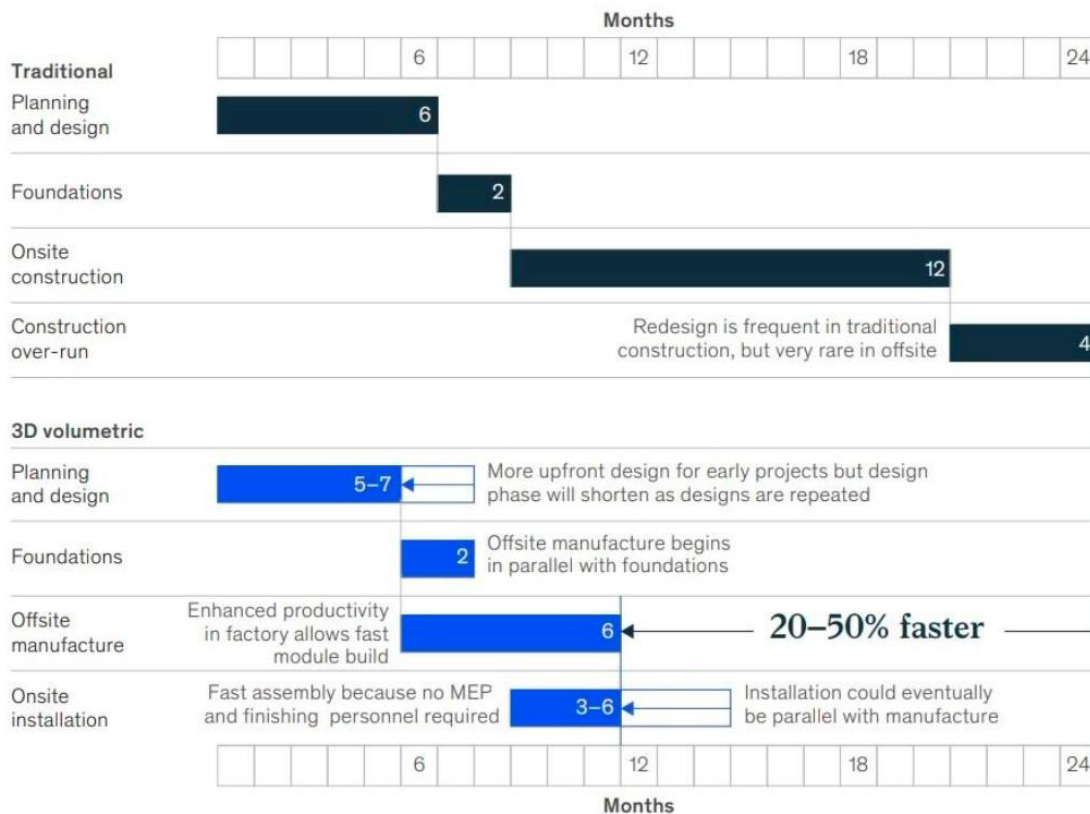


Figura 11 – Comparação do tempo de construção entre construção modular e construção tradicional -
 Fonte: *Modular construction: From projects to products* (McKinsey & Company Book, 2019)

A construção modular já se consolidou como uma opção em potencial para o cenário habitacional, sobretudo no Reino Unido, que a partir de 2004 passou a construir pelo menos 25% dos projetos de habitação social utilizando construções *off-site* (Royal Institute of British Architects 2021). Evidências apontam que a construção modular é mais eficiente e sustentável que os métodos tradicionais de construção. Através desse método construtivo é possível diminuir o desperdício para menos de 5%, além de gerar oportunidades para reciclagem, minimizar os gastos com transporte de elementos construtivos, diminuir ruídos, acidentes de trabalho e consumo energético em termos gerais (Ferdous et al. 2019).

Entretanto ainda existem alguns desafios para a utilização da construção modular. Analisando a figura 6 percebe-se que o processo se divide nas seguintes fases: (1) Planeamento e design; (2) Fundações; (3) Construção e fabricação; (4) Sobrecusto da obra e Instalações *on-site*. A fase de planeamento e design é particularmente crítica devido a falta de diretrizes de design para este tipo de método construtivo. Nesse contexto, Ferdous et al. (2019) salientam que *"uma abordagem de projeto confiável para estrutura modular é importante, pois o projeto ruim tem impacto significativo no custo geral da obra e nos cronogramas"*.

O design para a CM ainda se baseia em grande medida nos processos de projeto convencionais utilizados em métodos tradicionais de construção (Ferdous et al. 2019). Ainda há uma falta de diretrizes de projeto adequadas à realidade da CM e é este desafio que motiva o desenvolvimento da presente pesquisa. Estabelecer diretrizes de projeto dimensionais, geométricas e construtivas adequadas para estruturas modulares é fundamental, pois a fase de projeto determina até 80% dos custos operacionais da construção (Ferdous et al. 2019). Ferdous et al. (2019) aponta que o desenvolvimento de processos de projeto irá reduzir o custo geral das construções modulares e isso poderá levar ao crescimento potencial de edifícios modulares pré-fabricados, em especial no setor habitacional.

O processo de projeto corrente pode ser compreendido como uma sequência encadeada de decisões que evoluem progressivamente ao longo do desenvolvimento da concepção (Bueno et al. 2018). Inicia-se com a análise reiterada do problema, seguida da formulação e do aprimoramento de propostas que o reinterpretem sob perspectivas tecnológicas e operacionais. Esse percurso ocorre por meio de ciclos sucessivos de amadurecimento e aperfeiçoamento do design, nos quais a solução gradualmente substitui e redefine o problema inicial (Bueno et al. 2018).

Ali et al. (2023), apresenta um modelo de estudo para examinar a relação entre a aplicação do chamado "Fatores Críticos de Sucesso na Construção (FCSC)" e o "Sucesso Sustentável Geral (SSG)" no caso de projetos residenciais a custos controlados. Entre a lista dos FCSC mais frequentes na literatura, os elementos que lideraram a lista aparecendo em primeiro e segundo lugar respetivamente foram: "reconhecimento de economia de custos (REC)" e o intitulado "congelamento de projeto (CP)". De acordo com o autor:

"O REC está conectado à economia de custos por meio da modularização, que pode cortar despesas ao reduzir o pagamento de mão de obra, custos de andaimes, custos de supervisão e despesas de gerenciamento de segurança. Já o congelamento de projeto (CP) enfatiza o projeto inicial e a rápida conclusão da fase de projeto pelo contratante e proprietário para prosseguir com o planejamento da modularização." (Ali et al. 2023).

Uma maior rapidez no processo projectual acarretando na aprovação antecipada e no CP podem contribuir significativamente para identificar e abordar problemas potenciais no início da fase de projeto, reduzindo assim o risco de revisões dispendiosas ou atrasos durante a fase de construção. Tal abordagem pode garantir que o projeto esteja efetivamente alinhado com os resultados e especificações pretendidos, permitindo uma implementação mais eficiente e eficaz (Ali et al. 2023).

Ali et al. (2023) também sugere que as equipas de projeto devem enfatizar as aprovações antecipadas e o congelamento do projeto no plano de implementação de construções modulares para aprimorar o SSG, recomendando que futuras pesquisas explorem os fatores de sucesso identificados em sua pesquisa para contribuir para o avanço da compreensão dos FCSC e facilitadores na indústria da construção que levam ao SSG.

De acordo com Azhar et al. (2009) as decisões mais eficientes de sustentabilidade podem ser feitas durante os estágios iniciais do projeto, apesar das ferramentas tradicionais de design, como CAD, não fornecerem o que é necessário para que essas decisões sejam de fato consideradas desde o começo. O BIM surge como uma alternativa possível para identificar e resolver problemas durante fases iniciais de projeto, reduzindo a necessidade de retrabalho e possibilitando mais horas investidas na fase de conceção (Azhar et al. 2009).

Além disso é valido apontar que a utilização de BIM na construção civil vem se tornando mandatária em alguns países do mundo e estima-se que a aplicação dessa tecnologia será utilizada até mesmo em projetos de pequeno porte (Karimimansoob et al. 2024). De acordo com Karimimansoob et al. (2024) a tecnologia BIM veio para transformar a indústria da construção assim como a internet fez com a indústria da comunicação.

2.5 HABITAÇÃO A CUSTOS CONTROLADOS

Habitação é um dos elementos mais básicos da sociedade e representa um aspeto crítico para a promoção de bem-estar dos habitantes de um país. Este tema se torna ainda mais sensível no que tange o acesso à habitação para pessoas de baixa renda. A possibilidade de construir habitações a custos mais baixos é vista como prioridade para ampliar a oferta de moradias acessíveis à população economicamente vulnerável (Sá 2024).

A Habitação a Custos Controlados (HCC) corresponde a um modelo de promoção habitacional apoiado pelo Estado, destinado a ampliar o acesso à habitação por meio da concessão de incentivos fiscais e financeiros a entidades públicas e privadas. Em contrapartida, os empreendimentos devem cumprir requisitos previamente estabelecidos quanto à qualidade construtiva, às áreas máximas das habitações, aos custos de construção e aos preços de venda ou arrendamento, garantindo que as unidades produzidas permaneçam acessíveis a segmentos da população com menor capacidade económica. A promoção destes empreendimentos pode ser realizada por municípios, cooperativas de habitação, Instituições Particulares de Solidariedade Social (IPSS) e empresas privadas (Sá 2024).

No contexto das atuais políticas públicas de habitação em Portugal, a HCC assume um papel estratégico na mitigação do défice habitacional e na promoção de uma oferta mais inclusiva, procurando responder não apenas às necessidades das famílias de baixos rendimentos, mas também de agregados da classe média que enfrentam dificuldades de acesso ao mercado habitacional. Assim, este modelo procura ultrapassar a tradicional associação da habitação pública exclusivamente à assistência social, promovendo soluções habitacionais de qualidade, integradas no tecido urbano e orientadas para uma maior inclusão social (Sá 2024).

Assim sendo, a CM surge como alternativa potencialmente capaz de minimizar custos, acelerar o processo construtivo e promover a sustentabilidade (Ali et al. 2023). Entretanto, apesar dos benefícios apontados pela literatura, o setor privado ainda privilegia métodos tradicionais em detrimento da CM. Tal resistência decorre, em parte, da perceção de que componentes pré-fabricados não atendem aos requisitos mínimos de qualidade ou não apresentam desempenho satisfatório a longo prazo (Ali et al. 2023). A relação com os *stakeholders* é citada como um problema a ser superado em praticamente todos os artigos que abordam a hesitação da utilização da CM pelo mercado da construção. Ainda existe receio por parte dos *stakeholders* para investir neste método construtivo, em grande parte por se tratar de um processo ainda considerado novo e por um desconhecimento de suas vantagens (Ali et al. 2023).

Ainda assim, estudos indicam que a CM tende a assumir protagonismo no setor habitacional nas próximas gerações (Ferdous et al. 2019). No contexto português, mercado PRR, observa-se que os métodos tradicionais não têm sido suficientes para reduzir a escassez habitacional. Assim, a adoção da CM pode contribuir para ampliar a oferta de moradias e melhorar o desempenho da indústria, sobretudo pela aceleração dos cronogramas e pela padronização de componentes e processos (Bakhaty et al. 2024).

A CM viabiliza redução de custos por meio da produção em larga escala e oferece maior flexibilidade de design pela parametrização, permitindo expansões e modificações futuras. Além disso, amplia a oferta habitacional, eleva a qualidade dos empreendimentos e favorece a diversificação tipológica (Bakhaty et al. 2024), mas para que a construção industrializada seja viável no âmbito da habitação a custos controlados, o custo por unidade habitacional de construções modulares *off-site* ou *off-site modular construction* (OMC) não deve exceder o das metodologias convencionais. Tal objetivo depende, entre outros fatores, da produção em larga escala e da maximização do uso de insumos locais (Bakhaty et al. 2024).

Pode se dizer então que a adoção de métodos não tradicionais enfrenta desafios relacionados à falta de conhecimento, à perceção negativa entre trabalhadores e residentes e à histórica resistência da indústria da construção à inovação. Ainda assim, Bakhaty et al. (2024), reforça que a adoção dos OMC pode atualizar as capacidades da indústria, desde que haja investimento em ferramentas e conhecimento para coordenar e gerenciar o processo desde o início.

Nesse sentido, a padronização e a modularização devem ser consideradas já nas fases iniciais do design. Os autores Bakhaty et al. (2024) e Saad et al. (2025) destacam a implementação de tecnologias BIM como ferramenta fundamental para superar desafios de coordenação entre fábricas e canteiros, reforçando que abordar as barreiras à adoção dos OMC nas fases iniciais do planejamento promove melhores resultados, alinhados às chamadas “Necessidades Gerais Sustentáveis Futuras” (NGSF), que englobam:

- Necessidades econômicas: custos reduzidos por meio de padronização modular e menor retrabalho;
- Necessidades ambientais: redução de desperdício e controle da pegada de carbono por meio da pré-fabricação;
- Necessidades sociais: entrega mais rápida e melhor controle de qualidade para atender comunidades com poucos recursos.

Bakhaty et al. (2024) e Saad et al. (2025) identificam três principais barreiras para adoção dos OMC: disponibilidade de recursos; gestão de processos; e problemas e percepção. No que se refere à barreira de gestão de processos, recomenda-se:

“(1) Desenvolver processos e procedimentos padronizados para projetos de pré-fabricação, delineando etapas claras desde o projeto até à instalação;

(2) implementar um sistema robusto de monitoramento e avaliação para acompanhar o progresso do projeto, identificar possíveis bloqueios e abordar problemas em tempo hábil;

(3) desenvolver estratégias abrangentes de gerenciamento de riscos, como planejamento proativo para contingências ou desafios regulatórios para cumprir os cronogramas e orçamentos do projeto.” (Saad et al. 2025).

Assim, o propósito desta pesquisa consiste em contribuir para a superação da barreira relacionada à gestão de processos, por meio do desenvolvimento de fluxos de trabalho mais eficientes para o projeto de habitações a custos controlados utilizando construção modular. Yuan et al. (2018) aponta o design paramétrico como alternativa eficaz para o desenvolvimento de construções modulares. Já Lu et al. (2017) destaca o *Building Information Modelling* (BIM) como ferramenta útil para organizar o projeto dentro do tempo e custo especificados, já que ele proporciona uma gestão integrada da informação, melhorando a coordenação entre os participantes do projeto e permitindo análises e simulações antecipadas que apoiam decisões mais eficientes ao longo de todo o ciclo de vida da edificação.

A otimização dos processos de projeto por meio de ferramentas digitais aplicadas à construção modular apresenta relevância estratégica no contexto da habitação a custos controlados, pois contribui para a acessibilidade, a entrega mais rápida das unidades e a escalabilidade da produção (Saad et al. 2025). Ao aprimorar as ferramentas de colaboração digital e as abordagens de otimização de design, reforça-se a proposição de que a construção modular pode atuar como impulsionadora da transformação da habitação social rumo a um futuro mais sustentável (Saad et al. 2025).

2.6 PESQUISA DE MERCADO

Para orientar a pesquisa de mercado foi utilizado o RIBA (*Royal Institute of British Architects*) *Plan of Work*, como referência por fornecer uma estruturação em oito etapas que demonstra sistematicamente práticas de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA). O RIBA é responsável por detalhar tarefas digitais e requisitos de informação essenciais para a gestão de dados em um ambiente comum Common Data Environment (CDE).

Este plano de trabalho apresenta um catálogo de sete categorias de *Modern Methods of Construction* (MMC) e estabelece diretrizes de colaboração interdisciplinar que promovem a redução de riscos, a otimização de custos e prazos e o aumento da qualidade dos empreendimentos. A estrutura de definição de *Modern Methods of Construction* (MMC) divide-se em sete categorias, que podem ser resumidas da seguinte forma:

- Categoria 1 – Pré-fabricação volumétrica (sistemas 3D): Consiste na produção, em ambiente controlado de fábrica, de unidades tridimensionais que incluem desempenho estrutural e podem ser produzidas desde o chassi básico até totalmente acabadas, com revestimentos exteriores, instalações e acabamentos internos prontos para encaixe. Essas unidades podem ser empregadas em edifícios inteiros (sistema completo) ou em configurações híbridas, combinando métodos volumétricos com construção tradicional (Royal Institute of British Architects 2021).
- Categoria 2 – Pré-fabricação panelizada (sistemas 2D): Baseia-se em painéis planos estruturais (abertos ou fechados) fabricados em fábrica para compor, no canteiro, a estrutura tridimensional. Nos painéis abertos, apenas a estrutura é pré-fabricada; nos fechados, incorporam-se isolamentos, forros, caixilharias e, por vezes, sistemas de vedação, reduzindo o trabalho de acabamentos em obra (Royal Institute of British Architects 2021).
- Categoria 3 – Componentes pré-fabricados (estrutura não-sistemizada): Inclui elementos estruturais pré-fabricados isoladamente — como vigas, pilares, lajes, núcleos de escada e fundações pré-montadas — feitos de madeira maciça, perfis de aço ou concreto pré-moldado, mas sem integrar um sistema volumétrico completo. Esses componentes são instalados individualmente no local (Royal Institute of British Architects 2021).
- Categoria 4 – Manufatura aditiva (impressão 3D): Refere-se à impressão, em fábrica ou no próprio local, de partes estruturais ou não estruturais do edifício (muros, elementos de ligação, peças decorativas), a partir de modelos digitais e técnicas de fabricação aditiva. Pode abranger formas complexas e personalizadas, tanto portantes quanto meramente funcionais (Royal Institute of British Architects 2021).

- Categoria 5 – Sub-montagens e montagens não estruturais: Abrange unidades não portantes — por exemplo, “pods” volumétricos para cozinhas e banheiros, painéis de fachadas não estruturais, trechos de instalações elétricas e mecânicas, casseteados de cobertura e armários de distribuição — produzidas em fábrica e apenas apoiadas em elementos estruturais instalados em obra (Royal Institute of British Architects 2021).
- Categoria 6 – Produtos tradicionais com redução de mão de obra em obra: Envolve produtos de construção convencionais (tijolos, painéis de vedação, revestimentos de grande formato) pré-cortados, pré-medidos ou com características de encaixe que aceleram a instalação, mas sem recorrer a processos digitais avançados ou montagem em fábrica (Royal Institute of British Architects 2021).
- Categoria 7 – Processos de obra com ênfase em produtividade e qualidade: Inclui práticas inovadoras no canteiro destinadas a reduzir mão de obra, melhorar a garantia de qualidade e aumentar a produtividade, como enclausuramento ambiental, métodos enxutos apoiados por BIM, robótica de “workface”, realidades aumentada e virtual, exoesqueletos, drenagem e verificação digital (Royal Institute of British Architects 2021).

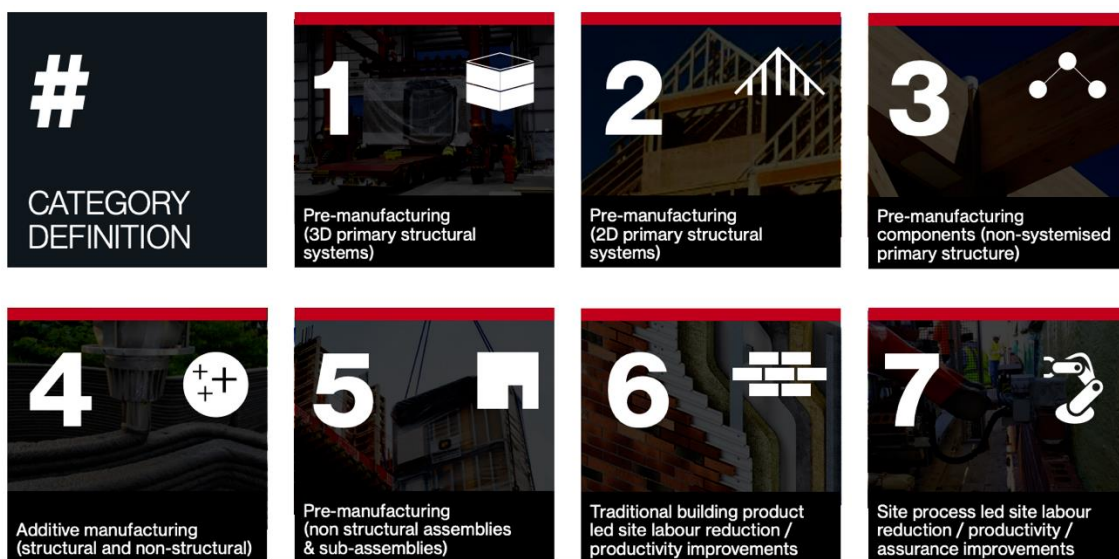


Figura 12 - Modern construction methods: introduction to the MMC definition framework - from: RIBA

O caso de estudo considera a utilização painéis de betão da KREAR que são do tipo I de construção modular e consequentemente se enquadram nas categorias 2 e 3 do RIBA *Plan of Work 2020*.

A seguir serão apresentados dois projetos que são considerados excelentes referências para o caso de estudo a ser apresentado no próximo capítulo, pois pertencem as categorias mais relevantes citadas acima e demonstram o impacto da relação entre a utilização de ferramentas digitais BIM, com os elementos construtivos e a consequência de considerar essa relação durante todo o processo de desenvolvimento da obra.

2.6.1 The Grange University Hospital, Llanfrechfa, Cwmbran, South Wales 2020

Esta referência foi construída para atender uma demanda emergencial imposta pela pandemia de Covid-19. e insere-se nas Categorias 2, 3 e 5 do RIBA *Plan of Work*. O hospital de 55.000 m², foi construído e inaugurado quatro meses antes do previsto, esta conquista é em grande parte atribuída a utilização de BIM nível 2, através de uma abordagem digital que maximizou a construção *off-site*, que por si só já é mais eficiente do que construções tradicionais (Laing O'Rourke, s.d.).

O BIM possibilitou a integração entre equipas de diferentes áreas, como arquitetura, engenharia estrutural, mecânica, elétrica entre outras. Todas as equipas estiveram comprometidas desde o início a utilizar uma abordagem digital através da tecnologia BIM, resultando em uma entrega antes do prazo estimado, abaixo do orçamento previsto e com uma qualidade construtiva de alto padrão (WSPglobal, s.d.).

As equipas de projeto adotaram a abordagem *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA) desde as fases iniciais, revisando geometria e dados dos painéis em ambiente 3D e comunicando-se via BIM collab. Nesse processo, conceberam, já na concepção, elementos pré-moldados e pré-fabricados — de colunas e painéis de fachada com isolamento estrutural, a “cápsulas” de banho e lajes alveolares — otimizando sua compatibilidade, repetibilidade e viabilidade de transporte (Laing O'Rourke, s.d.).

O planeamento logístico, aliado a um sistema integrado de modelação digital, permitiu rastrear e prever cada componente, garantindo desde o primeiro dia a exatidão dos dados e o cumprimento rigoroso do cronograma e do fluxo de caixa. Ao estabelecer uma “fonte única da verdade” padronizada, o DfMA reduziu drasticamente erros e retrabalhos, assegurou economia de custos e habilitou a entrega antecipada do maior projeto de capital então em curso no País de Gales (WSPglobal, s.d.).

Em números gerais, o projeto:

“Alcançou 50-55% de construção fora do local. Em comparação com a abordagem tradicional, isso economizou 42 semanas do programa – reduzindo-o em 23% – e aumentou a produtividade em 45%. Também economizou 237.099 horas de mão de obra no local, reduzindo os riscos à saúde e à segurança associados ao trabalho no local. A introdução de elementos manufaturados completos, como cabines de banheiro, no local, em vez de materiais individuais, reduziu a movimentação de veículos em 30%, reduzindo interrupções e emissões (WSPglobal, s.d.).”

O sucesso do projeto é atribuído à utilização de modelagem 3D por todas equipas desde a conceção, isto facilitou a comunicação entre as equipas reduzindo as chances de erro. Stuart Renshaw, o gerente da equipa de projeto relatou que a gestão do fluxo de informação foi crucial para superar prazo estipulado e tirar proveito dos benefícios da construção modular, desde a conceção até o fabrico e finalmente durante a montagem no local (WSPglobal, s.d.).

Além disso, a construção modular ainda possibilita futuras mudanças no layout do hospital e a adição de novos ambientes nos andares superiores. O modelo 3D é uma importante ferramenta também neste processo, já que ele possui todas as informações que a futura equipa do projeto irá precisar para realizar as modificações necessárias (WSPglobal, s.d.).

O modelo 3D também traz benefícios quanto à manutenção, pois disponibiliza todos os dados de projeto necessários para a criação de um plano de manutenção efetivo. O modelo também permitiu o uso de realidade virtual para revisões de projeto e para oferecer à equipe e aos investidores um tour virtual pelo edifício (Laing O'Rourke, s.d.).

Por fim, é possível afirmar que o sucesso do projeto, vencedor do prêmio "*Digital Construction Award at the Constructing Excellence in Wales*" em 2020 pode ser atribuído em grande parte a colaboração entre as equipas através do uso de ferramentas 3D para projetar, modelar, coordenar, fabricar e finalmente instalar os elementos de construção no local (WSPglobal, s.d.).

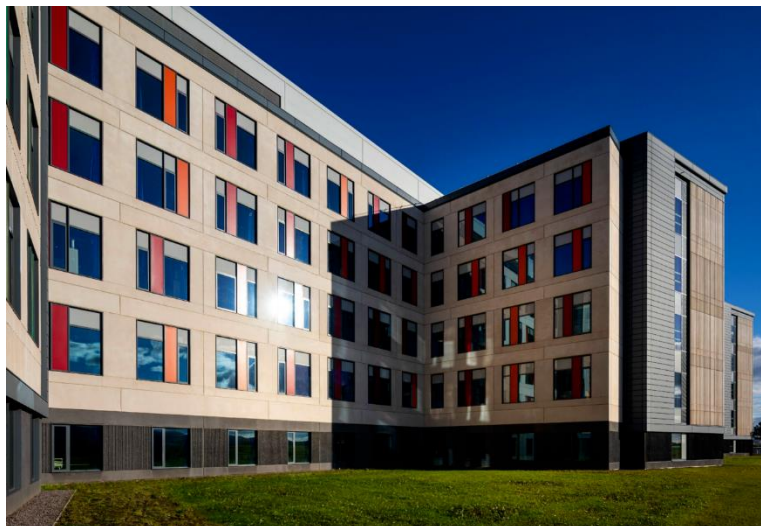


Figura 13 – Projeto The grange University Hospital Foto: www.michaelwhitestone.co.uk

2.6.2 ‘Q2’, King’s Cross Sports Hall, King’s Cross, London 2020

O edifício “Q2” insere-se nas Categorias 2 e 3 do RIBA, com aplicação de DfMA, conforme definido pelo RIBA (Royal Institute of British Architects 2021). Trata-se de um pavilhão desportivo de 2.017 m² para uso público, abrigando quatro quadras de badminton, uma de basquetebol, uma de voleibol, um campo de futebol de cinco, além de uma pequena área de fitness no primeiro piso (Stride Treglown, s.d.).

A localização sobre túneis ferroviários impôs a adoção de uma solução leve. Por esse motivo, optou-se pelo CLT (Cross-Laminated Timber) nas paredes e lajes, apoiadas em pilares e vigas de glulam, cuja menor densidade e capacidade de redistribuir cargas minimiza deslocamentos e tensões na estrutura subterrânea. A fundação é composta por laje em mistura de betão e sapatas contínuas a 90° em relação aos túneis, evitando concentrações de carga («King’s Cross Sports Hall» 2024).

Foi utilizado o software Navisworks 3D para a geração de arquivos para monitoramento de interferências e planejamento de montagem, assegurando a precisão na execução e evitando o retrabalho. As aberturas e ligações foram projetadas para garantir o posicionamento exato das portas e das passagens de instalações, assegurando também a precisão e minimizando retrabalhos («King’s Cross Sports Hall in London - e-architect», s.d.).

A pré-fabricação em ambiente controlado reduziu o tempo de obra em campo e os riscos laborais. As tolerâncias definidas em modelo BIM evitaram incompatibilidades durante a montagem e a revisão interativa do BIM garantiu o alinhamento às expectativas do cliente e antecipou soluções para eventuais problemas (Stride Treglown, s.d.).

O “Q2” demonstra como a integração de DfMA com ferramentas BIM e processos federados — em que cada disciplina desenvolve seu próprio modelo 3D de forma autônoma e esses modelos são reunidos em um ambiente comum de dados para coordenar espacialmente e detetar conflitos sem fundir permanentemente os arquivos originais — propicia soluções leves, sustentáveis e de elevado nível de controle de qualidade («King’s Cross Sports Hall» 2024).

A aplicação coordenada de CLT e glulam, aliada a estratégias digitais, confirmou-se fundamental para atender às exigências de recursos e restrições estruturais, ao mesmo tempo em que ofereceu ao cliente um modelo interativo de decisão, confiável e reproduzível em futuros empreendimentos (Stride Treglown, s.d.).



Figura 14 – Projeto Q2 King's Cross Sports Hall Foto: John Sturrock and Nicholas Doddik

2.7 SÍNTESE

Ao longo do capítulo 2 o estado da arte foi apresentado em cinco frentes principais: introdução ao método, análise bibliométrica, revisão bibliográfica, desenvolvimento temático e pesquisa de mercado. Na introdução o estado da arte foi mapeado por meio de uma metodologia bibliométrica, detalhando a escolha de palavras-chave e as bases de dados “Web of Science” e “Scopus”, utilizando a seguinte sequência lógica: seleção dos termos, coleta de dados e extração de conclusões que fundamentam as lacunas que pretenderei investigar.

A revisão bibliométrica revelou que a maioria dos artigos relaciona otimização a eficiência energética, com raras menções ao aperfeiçoamento de “*workflows*” ou processos de projeto, observando-se assim uma lacuna de conhecimento e justificando a importância da presente pesquisa. É possível perceber, que apesar de parecerem óbvias as vantagens da correlação entre otimização dos processos de projeto e construção modular aplicada à habitação a custos controlados, isto ainda é pouco explorado na literatura.

Dessa maneira, a pesquisa explora a conexão entre “*social housing*”, “*otimização*”, “BIM” e “*modular construction*” ou “*prefabrication*” demonstrando o quando a interface entre esses diferentes temas é relevante. Diante desse cenário, evidencia-se que o desafio central não reside apenas na escolha do método construtivo, mas na estruturação de processos projetuais capazes de reduzir riscos, retrabalhos e ineficiências que impactam diretamente o custo final da unidade habitacional.

Após definir a CM como a produção *off-site* de módulos, conforme Ferdous et al. (2019), e apontar os três tipos principais, optando pelo Tipo I (painéis 2D) em razão de suas vantagens estruturais e econômicas (Ferdous et al. 2019), destaca-se que, embora o planeamento modular não reduza o tempo de projeto, ele encurta a fase de construção em 20–50 %, minimizando retrabalhos. A CM é amplamente vinculada à redução de desperdício e à qualidade superior proporcionada pelo controle fabril (Ferdous et al. 2019), entretanto a falta de diretrizes de projeto específicas para este método construtivos ainda é um desafio relevante e, portanto, central para a presente pesquisa.

A habitação social é essencial para populações de baixa renda e a construção modular pode reduzir custos, acelerar cronogramas e promover sustentabilidade (Ali et al. 2023). Contudo, o setor privado ainda prefere métodos convencionais por percepções de risco e desconhecimento das vantagens. As parcerias público-privadas são citadas então como uma solução para mitigar riscos financeiros e viabilizar a construção em grande escala, condição necessária para equiparar os custos unitários.

No contexto português, o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) é relacionado à necessidade de métodos que aumentem a oferta habitacional, e a construção modular pode ser uma alternativa para contribuir com esse aumento. Os pilares para adoção do MMC em habitação social são identificados e é perceptível que processos de projeto paramétrico e BIM são cruciais para reduzir redundâncias, automatizar tarefas e alcançar o congelamento de projeto (CP) antecipado (Saad et al. 2025).

A pesquisa de mercado demonstra, através de projetos já executados e citados no RIBA, quais são os impactos na prática de adotar estratégias DfMA que otimizam o projeto e consideram o método construtivo *off-site* desde a sua concepção. Como conclusão, é possível perceber os ganhos de produtividade, qualidade e drástica redução de prazos e retrabalhos por meio do uso de BIM nível 2 e DfMA, aplicados em projetos que se situam dentro das categorias 2 (painéis 2D) e 3 (componentes pré-fabricados) definidas pelo RIBA *Plan of Work 2020* para identificar as diferentes aplicações das MMC.

Nesse contexto, a construção industrial pode ser entendida como aplicação direta dos MMC, caracterizada pela utilização de painéis pré-fabricados, produzidos em ambiente controlado e posteriormente transportados e montados no local. Sua lógica produtiva baseada na repetição e padronização dimensional, permite ganhos de escala, maior controle de qualidade e redução da dependência de mão de obra no canteiro (Royal Institute of British Architects 2021). Ainda que admita diferentes níveis de industrialização e combinações com métodos tradicionais, a construção modular exige uma abordagem projectual compatível com a lógica de sistemas e é nesse ponto que o design paramétrico assume papel estruturante na presente pesquisa

Por fim, o objetivo desta pesquisa é desenvolver um workflow que facilite a elaboração de projetos de construção modular, combinando BIM e design paramétrico para reduzir o tempo de desenvolvimento, minimizar retrabalhos, diminuir a probabilidade de erro humano e otimizar recursos na fase de projeto, contribuindo para alcançar o congelamento de projeto (CP) com mais facilidade.

Para operacionalizar esse objetivo, propõe-se a criação de um *workflow* que oriente o processo projectual e a utilização integrada de ferramentas digitais desde a conceituação até o projeto final. Essa abordagem busca reduzir redundâncias, automatizar tarefas repetitivas e otimizar a alocação de recursos, atuando diretamente sobre a barreira de gestão de processos identificada pela literatura. O desenvolvimento deste processo será abordado a seguir no capítulo 3 caso de estudo.

3

CASO DE ESTUDO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento da pesquisa, demonstrando os resultados obtidos a partir da experimentação proposta como caso de estudo. A pesquisa busca investigar o emprego do design paramétrico ao testar diferentes composições de fachadas modulares em betão produzidas pela empresa KREAR. Para isto, desenvolve-se uma metodologia de projeto capaz de gerar rapidamente designs otimizados do ponto de vista do custo final da construção. Como resultado, procura-se verificar a pertinência do uso de modelagem paramétrica e interoperabilidade entre softwares em fases ainda iniciais de projetos de Habitações a Custos Controlados.

3.2 PERTINÊNCIA DO CASO DE ESTUDO

Segundo Peters & Peters (2018), o arquiteto contemporâneo deve ser capaz de operar em um ambiente digital em constante transformação, recorrendo a um conjunto diversificado de ferramentas que dão suporte a atividades como elaboração de documentos, comunicação, produção gráfica, desenho técnico, conceção projectual e aplicação de novas tecnologias da informação. Conforme apontado por Gaha (2023), as contribuições de Peters & Peters (2018) evidenciam que a inovação tecnológica, fundamentada em softwares digitais voltados ao desempenho, representa um processo em curso que vem promovendo transformações orientadas à otimização do projeto arquitetónico.

À luz do exposto por Peters & Peters (2028) e por Gaha (2023), a relevância da presente pesquisa fundamenta-se na necessidade de investigar o design paramétrico como um processo projectual estratégico, especialmente quando aplicada às fases iniciais de projetos de Habitações a Custos Controlados (HCC). Peters & Peters (2018) ressaltam que o uso de algoritmos e da simulação computacional no ambiente digital amplia a capacidade de gerar e avaliar múltiplas alternativas de projeto, permitindo decisões mais informadas desde os estágios preliminares do desenvolvimento arquitetónico.

Essa abordagem torna-se particularmente significativa no contexto de HCC, no qual restrições econômicas exigem soluções construtivas eficientes e rigorosamente otimizadas. Conforme apontado por Gaha (2023), a inovação tecnológica associada a softwares digitais de desempenho configura um processo de transformação voltado à otimização do projeto arquitetónico, o que reforça a pertinência de investigar metodologias capazes de integrar desempenho, custo e viabilidade construtiva. Assim, ao explorar a interoperabilidade entre softwares e o uso de processos paramétricos para a geração rápida de soluções arquitetónicas, a pesquisa contribui para demonstrar o potencial da modelagem paramétrica como instrumento de apoio à conceção de edificações mais acessíveis, econômicas e adequadas a projetos de HCC.

Por fim, é importante reforçar que embora a relação entre construção modular e softwares digitais seja um tema amplamente explorado, conforme apontado no capítulo 2, a aplicação dessas tecnologias no contexto português, particularmente no segmento de habitações a custos controlados, ainda é incipiente. Este trabalho procura contribuir para essa lacuna de pesquisa, abordando as vantagens da utilização de modelagem algorítmica-paramétrica e plataformas integradas, como Rhino Inside Revit, para a construção modular aplicada ao cenário de Habitação a custos controlados em Portugal.

3.3 ENQUADRAMENTO

O presente trabalho insere-se no contexto da HCC financiada pelo PRR e da transformação dos processos produtivos da construção civil, com ênfase na adoção de estratégias orientadas à industrialização, racionalização e aumento de eficiência na produção de habitações a custos controlados. Nesse sentido, a estratégia Design for Manufacture and Assembly (DfMA) constitui o principal eixo conceitual da pesquisa, uma vez que estabelece as bases para a adoção dos Modern Methods of Construction (MMC) e para a reorganização do processo projectual a partir de uma lógica produtiva industrial (Mark Farmer 2016).

No âmbito do DfMA, o edifício deixa de ser concebido como um artefacto único e passa a ser compreendido como um conjunto de produtos, componentes e subsistemas coordenados entre si. Essa abordagem pressupõe a antecipação das decisões de projeto, a padronização de soluções e o controle rigoroso das interfaces entre os elementos construtivos, com o objetivo de viabilizar processos de fabricação fora do canteiro, montagem mais eficiente em obra e maior previsibilidade de custos, prazos e desempenho (Mark Farmer 2016). Tais características revelam-se particularmente relevantes para empreendimentos habitacionais de interesse social, nos quais a redução de desperdícios, a repetibilidade e a confiabilidade do processo produtivo são fatores determinantes para a viabilidade econômica (Mark Farmer 2016).

A adoção da construção industrializada como método construtivo, articulada aos princípios do DfMA, implica mudanças significativas em relação ao modelo tradicional de desenvolvimento de projetos (Royal Institute of British Architects 2021). Conforme sistematizado no RIBA Plan of Work, especialmente no que tange o DfMA, o processo projectual passa a concentrar esforços nas fases iniciais, promovendo o detalhamento antecipado, a compatibilização rigorosa dos sistemas e a definição prévia das interfaces entre componentes ainda nas etapas de concepção e coordenação espacial (Royal Institute of British Architects 2021). Essa antecipação é fundamental para garantir a viabilidade da produção industrializada, já que o processo fabril exige maior definição e estabilidade das decisões de projeto.

Compreendido como uma metodologia contemporânea da arquitetura, o design paramétrico se fundamenta na aplicação de tecnologias digitais avançadas para conceber edificações e espaços públicos, promovendo maior controle e precisão no processo de concepção projectual (Gaha 2023). Ele baseia-se na definição e manipulação de parâmetros capazes de orientar integralmente o desenvolvimento do projeto (Gaha 2023). O uso do design paramétrico oferece aos arquitetos e designers a capacidade de conceber e materializar soluções de projeto, além de analisar e validar múltiplas alternativas de projeto de maneira ágil e eficaz, considerando objetivos específicos e condicionantes previamente estabelecidos (Lafhaj et al. 2023).

No âmbito do projeto arquitetônico, a abordagem paramétrica fundamenta-se na aplicação de mecanismos de modelagem capazes de gerar soluções construtivas detalhadas a partir de parâmetros variáveis (Gaha 2023). Tal processo baseia-se na elaboração de modelos tridimensionais nos quais os parâmetros estão diretamente associados aos elementos e sistemas da edificação, permitindo a otimização da construção em si, do desempenho estrutural, da eficiência no uso de materiais e de outros fatores relevantes (Gaha 2023).

O DP viabiliza a otimização sistematizada, orientada por regras, o que contribui para o aprimoramento da construção modular ao permitir ajustes dinâmicos de dimensões, geometrias e materiais (Pessoa et al. 2026). A partir do estabelecimento de relações entre as variáveis de projeto, o processo de otimização torna-se mais eficiente ao conciliar requisitos arquitetônicos com o objetivo de reduzir custos, por exemplo.

Dessa forma, o âmbito da pesquisa concentra-se na investigação das relações entre DfMA, CM e DP como um sistema integrado de concepção e produção. Parte-se do pressuposto de que a articulação entre esses conceitos não apenas qualifica o processo de projeto, mas também amplia o potencial de racionalização da construção, contribuindo para a redução de custos, o aumento da produtividade e a melhoria do desempenho global das edificações, em consonância com as diretrizes contemporâneas da construção industrializada (Mark Farmer 2016; Royal Institute of British Architects 2021).

3.4 OBJETIVOS

Pretende-se analisar de que forma as ferramentas digitais podem contribuir de maneira efetiva para a tomada de decisão orientada por desempenho e verificar como a metodologia proposta pode tornar a fase da concepção projectual mais eficiente e assertiva através de decisões baseadas em custos. Busca-se desenvolver um *workflow* que viabilize, ainda nas fases iniciais de projeto, a concepção e a comparação de diferentes alternativas com base em estimativas preliminares de custo, tradicionalmente consideradas apenas em etapas mais avançadas. Através da interoperabilidade entre softwares proposta pelo *workflow*, objetiva-se identificar as vantagens e desvantagens deste processo especialmente no contexto das HCC. Em linhas gerais, os objetivos podem ser descritos na lista apresentada abaixo:

3.4.1 Objetivo geral

- Demonstrar o impacto das decisões de projeto ainda em fase inicial, desenvolvendo metodologia replicável

3.4.2 Objetivos específicos

- Modelar um projeto pré-existente de HCC a considerar o sistema de painéis estruturais da KREAR
- Testar a interoperabilidade entre softwares
- Elaborar estimativa de custos com base em dados fornecidos pela KREAR
- Realizar análise comparativa de custos
- Demonstrar as vantagens e desvantagens do processo como um todo.

3.5 METODOLOGIA

3.5.1 Métodos

Para testar a hipótese proposta de que as ferramentas digitais contribuem para a otimização do processo de projeto de HCC, objetivando a redução de custos, foi proposto um caso de estudo dividido em três etapas sequenciais, baseado em uma abordagem metodológica mista que combina teoria e prática. O diagrama a seguir sintetiza esse percurso metodológico, evidenciando os softwares empregados em cada etapa e a forma como estes se articulam em um fluxo linear de interoperabilidade, no qual cada ferramenta desempenha um papel específico ao longo do processo.

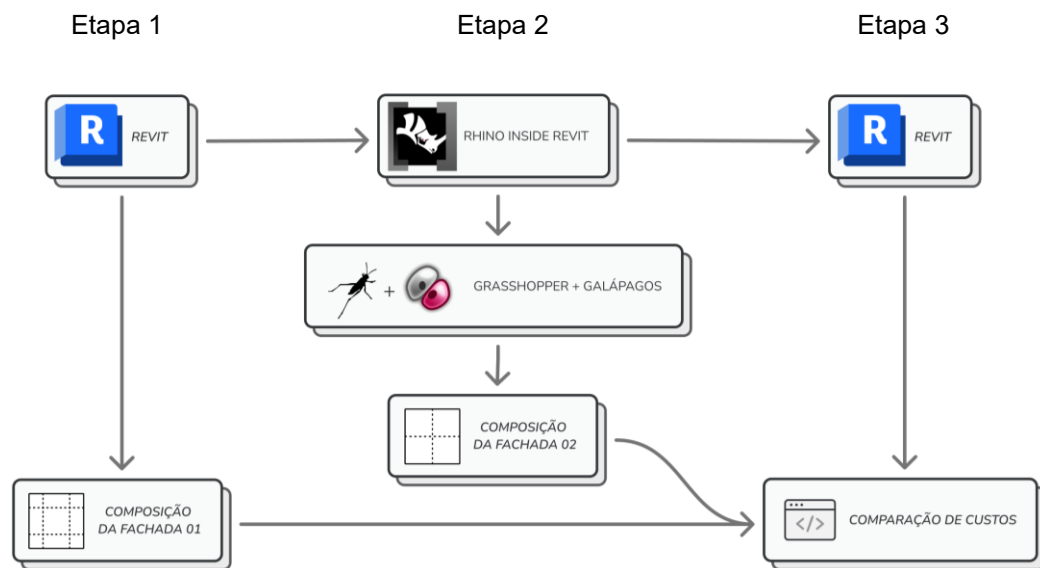


Figura 15 - Fluxograma do plano experimental Fonte: Autora

Na primeira etapa, será realizada a modelagem de painéis de fachada em betão da empresa KREAR, em ambiente Revit. Nessa etapa os painéis serão utilizados para a modelagem manual da fachada de um projeto de HCC no próprio Revit, reproduzindo o método tradicionalmente adotado em escritórios de arquitetura, o que resulta na primeira composição de fachada.

Na segunda etapa, os dados geométricos dos painéis modelados no Revit são extraídos por meio do uso do Rhino Inside Revit e transferidos para o ambiente do Grasshopper. Nesse contexto, é empregue o algoritmo evolutivo Galápagos, responsável por conduzir um processo de otimização generativa. O algoritmo atua sobre a divisão e configuração dos painéis de fachada, buscando soluções otimizadas a partir de critérios previamente definidos. O resultado dessa etapa corresponde a uma nova composição de fachada, derivada do processo computacional de otimização.

Por fim, na terceira etapa, é realizada uma análise comparativa entre a solução obtida por meio do Galapagos e aquela desenvolvida manualmente na etapa inicial. Essa comparação tem como finalidade verificar a hipótese da pesquisa, avaliando se o Galapagos foi capaz de produzir uma solução mais eficiente do ponto de vista da otimização de custos em relação ao método tradicional de projeto. Por fim, serão discutidos as vantagens, as desvantagens e os resultados do processo como um todo.

Para tal, será necessário trabalhar com a interoperabilidade entre softwares que permitam articular exploração formal, análise de desempenho e procedimentos de otimização (Pessoa et al. 2026). Nesse processo, o Revit é utilizado para desenhar uma proposta inicial de fachadas, enquanto o Rhino e o Grasshopper são responsáveis por otimizar o que foi proposto e exportar para o Revit o resultado. A partir do caso de estudo o trabalho pretende demonstrar como e se o design paramétrico pode possibilitar a otimização de custos.

O caso de estudo pretende demonstrar que o projeto concebido considerando os princípios do DfMA otimiza os custos da obra. A metodologia é intrinsecamente uma transposição direta do DfMA conceito para o DfMA aplicado, e atua verificando e contabilizando as tarefas de produção e de montagem que podem influenciar em termos de desenho. Neste processo é o designer ou projetista que ao alterar parâmetros consegue reduzir custos e chegar a diferentes soluções geométricas. Ao fim, pretende-se verificar objetivamente o custo de projetar desconsiderando o DfMA desde o princípio.

3.5.2 Ferramentas

O desenvolvimento metodológico apoia-se no uso integrado de ferramentas digitais capazes de articular modelagem BIM, DP e processos de otimização orientados por desempenho. A escolha e a organização desses softwares não se dão de forma aleatória, mas obedecem a uma lógica sequencial que acompanha as etapas da investigação, desde a modelagem dos elementos construtivos até à avaliação comparativa dos resultados obtidos.

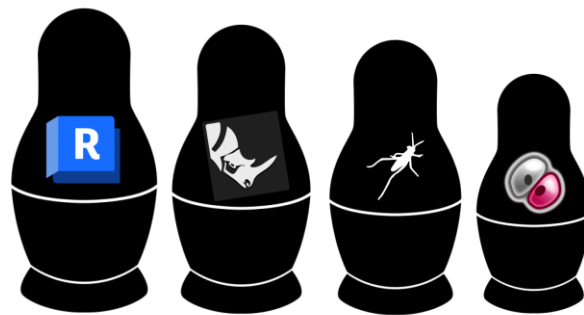


Figura 16 - Diagrama conceitual da interoperabilidade entre ferramentas digitais no ambiente Rhino Inside Revit Fonte: Autora

Nesse contexto, o *plug-in* elencado como base para o desenvolvimento do caso de estudo foi o Rhino Inside Revit. A seleção dessa ferramenta decorre de uma combinação de fatores, entre os quais se destaca a interoperabilidade entre plataformas. O Rhino Inside Revit possibilita uma integração direta entre o ambiente BIM do Revit e as ferramentas de modelagem algorítmica do Grasshopper, eliminando etapas intermediárias de exportação e importação de dados e permitindo um fluxo de trabalho contínuo, promovendo uma interoperabilidade fluida entre a modelagem algorítmica e a documentação técnica.

Essa integração viabiliza o desenvolvimento de geometrias complexas e a automatização de processos, ao mesmo tempo em que assegura a consistência com os requisitos próprios do ambiente BIM, tais como a associação de parâmetros, fases construtivas e informações não gráficas vinculadas aos elementos construtivos. Tais características mostram-se particularmente relevantes em projetos de construção modular, nos quais a precisão geométrica, a rastreabilidade da informação e o controle das variações são fundamentais para a viabilidade produtiva (Brasil e Martinez 2022).

Embora existam outras ferramentas com potencial semelhante, como o Blender — que opera diretamente com arquivos no formato IFC (*Industry Foundation Classes*) e possui código aberto —, a escolha pelo Rhino Inside Revit fundamenta-se, em parte, na familiaridade do autor com esse workflow específico. Essa familiaridade permite maior domínio sobre os parâmetros geométricos e sobre a integração de dados, reduzindo incertezas operacionais e favorecendo um controle mais rigoroso do processo de modelagem e análise.

Além disso, a utilização do Rhino Inside Revit está alinhada aos princípios da construção industrializada, que demandam soluções repetíveis, porém adaptáveis. Esse entendimento é discutido no DfMA Overlay do RIBA Plan of Work, no qual se destaca a importância do uso de ferramentas digitais que promovam padronização, eficiência e rastreabilidade da informação ao longo de todo o ciclo de vida do projeto (Royal Institute of British Architects 2021). Dessa forma, a ferramenta selecionada não apenas atende às exigências técnicas da pesquisa, mas também dialoga diretamente com o arcabouço teórico que fundamenta a adoção do DfMA.

No que se refere à modelagem paramétrica, o Rhinoceros 3D e o Grasshopper atuam como a plataforma central de modelagem geométrica. O Rhino 3D trata-se de um software CAD cuja base se fundamenta em modelos matemáticos do tipo NURBS, o que possibilita elevada precisão e flexibilidade formal (Fink e Koenig 2019). A introdução do Grasshopper, como interface de programação visual integrada ao Rhinoceros, ampliou significativamente suas capacidades ao permitir a criação de geometrias adaptáveis por meio da definição de variáveis e relações paramétricas (Fink e Koenig 2019).

O Grasshopper consolidou-se como uma ferramenta amplamente adotada no campo do projeto paramétrico, em grande medida devido à possibilidade de criação de ferramentas personalizadas pelos próprios usuários (Apellániz e Vierlinger 2022). Essa característica favoreceu o desenvolvimento de plugins específicos para diferentes demandas de projeto, ampliando o seu campo de aplicação e sua adaptabilidade a distintos contextos de projeto (Apellániz e Vierlinger 2022). Sendo assim, o Rhinoceros concentra a modelagem geométrica, enquanto o Grasshopper atua como ambiente de automação de tarefas, definição de algoritmos e manipulação de parâmetros, configurando um sistema robusto para a exploração e controle da forma (Apellániz e Vierlinger 2022).

A adoção dessa lógica paramétrica insere a pesquisa no campo do design generativo, entendido como um processo no qual sistemas são desenvolvidos para gerar formas emergentes a partir de relações, regras normativas e parâmetros previamente definidos (Oxman e Gu 2015). Nesse contexto, as soluções de projeto não são desenhadas de forma direta, mas resultam da execução de processos generativos que incorporam objetivos e restrições estabelecidos pelo projetista. Tal abordagem oferece mecanismos mais sofisticados de controle e tomada de decisão, orientando a seleção das soluções mais adequadas aos objetivos do projeto (Oxman e Gu 2015).

Entretanto, a parametrização também implica um aumento significativo da complexidade do processo de projeto (Aish e Woodbury 2005). O projetista deixa de atuar apenas na modelagem do objeto final e passa a estruturar um sistema conceitual capaz de reger as variações e parametrização do projeto. Esse deslocamento pode influenciar positiva ou negativamente o desempenho das tarefas, a carga cognitiva envolvida e a percepção dos resultados, dependendo do nível de domínio do sistema paramétrico desenvolvido (Aish e Woodbury 2005). Sob uma perspectiva favorável, a parametrização amplia a exploração formal, reduz o tempo necessário para alterações e favorece soluções mais sensíveis ao contexto. Por outro lado, pode aumentar a complexidade das decisões e o número de variáveis a serem consideradas, ainda que contribua para uma compreensão mais profunda da lógica do objeto projetado (Aish e Woodbury 2005).

No âmbito específico da otimização, a pesquisa utiliza o Galápagos, um add-on do Grasshopper definido como um solucionador evolutivo baseado em algoritmos genéticos. O Galápagos opera a partir de um genoma de prospeção, buscando maximizar ou minimizar uma função de aptidão previamente definida (Gaha 2023). O algoritmo adota uma estratégia evolutiva de objetivo único, o que simplifica o processo de otimização, embora imponha limitações quanto à complexidade das análises possíveis (Gaha 2023).

Essa ferramenta insere-se no campo do design orientado por desempenho ao permitir a avaliação automática de critérios como a escolha de materiais e a composição de soluções construtivas (Pessoa et al. 2026). Seu funcionamento baseia-se na manipulação de entradas variáveis, ajustando automaticamente um conjunto extensivo de parâmetros — denominados genomas — que, em um processo convencional, demandariam alterações manuais por parte do projetista (Pessoa et al. 2026). Na presente pesquisa, o Galápagos é empregue com o objetivo de identificar composições de fachada mais eficientes do ponto de vista da economia de custos, refinando iterativamente os parâmetros de projeto até alcançar soluções otimizadas sob a ótica da racionalização econômica.

É importante destacar que o DP e o DG constituem abordagens de projeto assistidas por algoritmos, porém diferenciam-se quanto à sua lógica operacional e ao papel desempenhado pelo projetista no processo de geração das soluções. O design paramétrico baseia-se na definição de relações entre objetos e parâmetros, de modo que alterações em determinados elementos se propagam automaticamente pelo modelo, permitindo a exploração de múltiplas variações a partir de um conjunto previamente estruturado de regras e restrições. Já o design generativo opera por meio de mecanismos inspirados em processos evolucionários, utilizando conceitos como reprodução, herança, variação e seleção para produzir e avaliar sucessivas alternativas de projeto dentro de um amplo espaço de possibilidades (Mineiro e Magalhães 2019).

Enquanto o design paramétrico busca estruturar e controlar relações entre parâmetros para gerar diferentes configurações formais, o design generativo concentra-se na criação de sistemas capazes de explorar automaticamente soluções potencialmente inesperadas ou otimizadas, a partir de critérios previamente estabelecidos pelo projetista. Em ambos os casos, o foco desloca-se da concepção direta da forma para a definição das lógicas e processos que orientam sua geração, caracterizando uma abordagem baseada na codificação de relações e na exploração da complexidade inerente ao projeto (Mineiro e Magalhães 2019). Nesta pesquisa, o DP refere-se aos processos desenvolvidos em ambiente Grasshopper, enquanto o design generativo diz respeito à aplicação do Galapagos, que por sua vez está inserido no ambiente Grasshopper.

Dessa forma, o conjunto de ferramentas adotado — Revit, Rhinoceros, Grasshopper e Galápagos — estrutura um fluxo de trabalho ou *workflow* integrado que acompanha as etapas da pesquisa, desde a modelagem BIM dos painéis modulares até à geração, avaliação e comparação de soluções otimizadas. A escolha desses softwares revela-se coerente com a proposta metodológica da dissertação, que busca explorar o potencial das ferramentas digitais na integração entre princípios DfMA (como padronização de componentes, economia de escala e integração entre projeto, fabricação e montagem (Royal Institute of British Architects 2021), workflows paramétricos e processos automatizados de otimização aplicados à habitação a custos controlados.

Em síntese, na metodologia proposta, o Rhino Inside Revit constitui o ambiente no qual o caso de estudo é desenvolvido, permitindo a integração direta entre o Grasshopper e o Revit e reunindo a modelação paramétrica e a gestão da informação BIM em um único fluxo de trabalho. O Revit é utilizado para modelar a Fachada 01 e extrair os quantitativos e os custos iniciais, que servem como referência para a comparação com os resultados obtidos nas etapas subsequentes. O Grasshopper é responsável pela automatização do processo de projeto por meio de algoritmos e parâmetros, possibilitando a geração rápida e flexível de diferentes soluções. Por sua vez, o Galapagos realiza a otimização dos parâmetros, identificando a alternativa de menor custo. Nesse contexto, o Rhinoceros desempenha exclusivamente a função de viabilizar a integração entre a modelação paramétrica e o ambiente BIM. Ressalta-se, contudo, que o foco da pesquisa não reside nos softwares individualmente, mas na forma como a integração entre eles pode contribuir para apoiar o processo de tomada de decisão em projeto.

3.6 PLANO EXPERIMENTAL

3.6.1 Resultados Esperados

É esperado verificar se a metodologia proposta apresenta potencial para otimizar os processos de CM, favorecendo ganhos de escala e aumento de produtividade. Isto, pois, de acordo com os critérios de industrialização, a integração de ferramentas baseadas em sistemas de análise de dados em tempo real tende a aprimorar os métodos de otimização, possibilitando o desenvolvimento de soluções de painéis modulares com maior eficiência econômica e capacidade de adaptação a diferentes contextos projetais. Em linhas gerais, espera-se demonstrar com o caso de estudo que a aplicação de métodos de projeto computacional contribui de maneira significativa para o aumento da eficiência do projeto arquitetônico em fases ainda iniciais de projeto.

Ainda que a hipótese não seja plenamente confirmada, considera-se que a aceleração do processo projectual proporcionada pelo uso das ferramentas computacionais representa, por si só, um resultado relevante, uma vez que a redução do tempo de projeto tende a impactar positivamente o cronograma de execução da obra e, consequentemente, os custos globais do empreendimento. Tal contribuição revela-se particularmente relevante no contexto de Habitações a Custos Controlados (HCC), nas quais o fator econômico exerce papel determinante para a viabilidade e execução dos empreendimentos.

3.6.2 Etapa 1

Neste capítulo apresenta-se a descrição da Etapa 1 do caso de estudo proposto. Essa fase compreende o levantamento e a sistematização de dados relevantes para o desenvolvimento, em ambiente Revit, dos painéis de concreto da empresa KREAR. Serão apresentadas informações quanto às restrições dimensionais e de transporte, assim como informações pertinentes para precificação do material dos painéis. Serão também abordados aspectos específicos relacionados à criação do painel, e o projeto de HCC adotado como objeto do caso de estudo a ser apresentado. O diagrama a seguir ilustra a posição e a função dessa etapa no processo.

A primeira etapa se encerra com a criação de uma nova tipologia dentro da família de paredes básicas no Revit, com a elaboração da primeira composição de fachada feita manualmente e a precificação dos custos de materialidade. Até o fim da primeira etapa, ainda não é possível saber se a fachada modelada manualmente, de forma tradicional e sem o apoio das ferramentas digitais de otimização generativa, é a opção mais vantajosa economicamente.

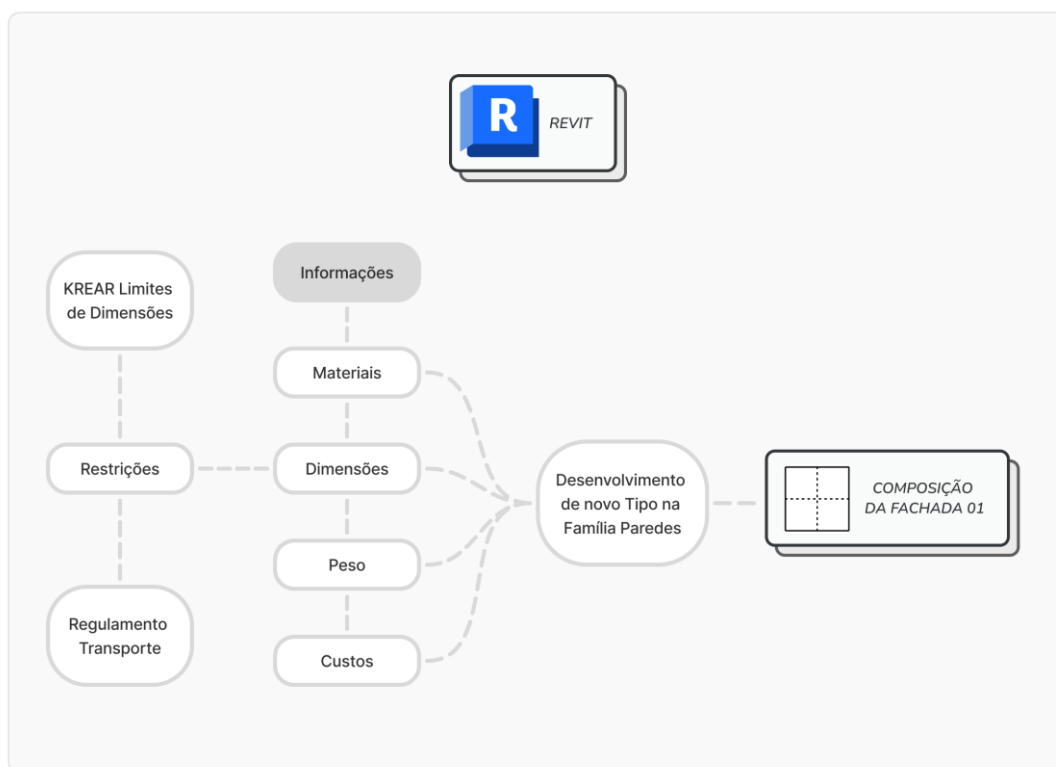


Figura 17 - Etapa 1 do plano experimental Fonte: Autora

3.6.2.1 Apresentação do “Projeto Catavento” utilizado para Caso de Estudo:

O projeto nomeado “Casa Catavento” a ser considerado para o caso de estudo foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Projeto Integrado I, do curso de Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios. A proposta localiza-se na Rua Abel Severino Felicíssimo, N5, Alcácer do Sal, Portugal. O desafio consistiu na conceção de habitações unifamiliares evolutivas a custos controlados, tomando como referência o sistema construtivo de impressão 3D desenvolvido pela empresa HAVElar. A solução foi concebida com potencial de reprodução em diferentes contextos, considerando como premissa a existência de terrenos planos adequados à execução por impressão 3D.



Figura 18 - Perspectiva da “Casa Catavento” proposta para habitações unifamiliares impressas Fonte:
Autora

Para alcançar uma solução arquitetônica evolutiva, que seja capaz de abranger diferentes tipologias em uma mesma área, o projeto foi desenvolvido tendo como base um núcleo principal, composto por quarto de banho e cozinha. A área social e os quartos foram dispostos ao redor do núcleo principal, dentro da extensão de 11m x 12m, área correspondente ao alcance da máquina de impressão 3D de grande escala da HAVElar.

Como estratégia de planeamento, foi proposto um módulo standard composto por T0 + T1 + T1 e evoluções provenientes desse módulo base, alcançadas a partir do deslocamento pontual de paredes modulares. A disposição dos quartos em relação ao núcleo principal possibilita que todas as variações aconteçam através de pequenas modificações. A partir do deslocamento de paredes modulares, o módulo standard pode evoluir para o que chamamos de evolução azul (T0 + T0 + T2), verde (T1 + T2), e rosa (T0 + T3).



Figura 19 - Tipologia módulo standard Fonte: Autora

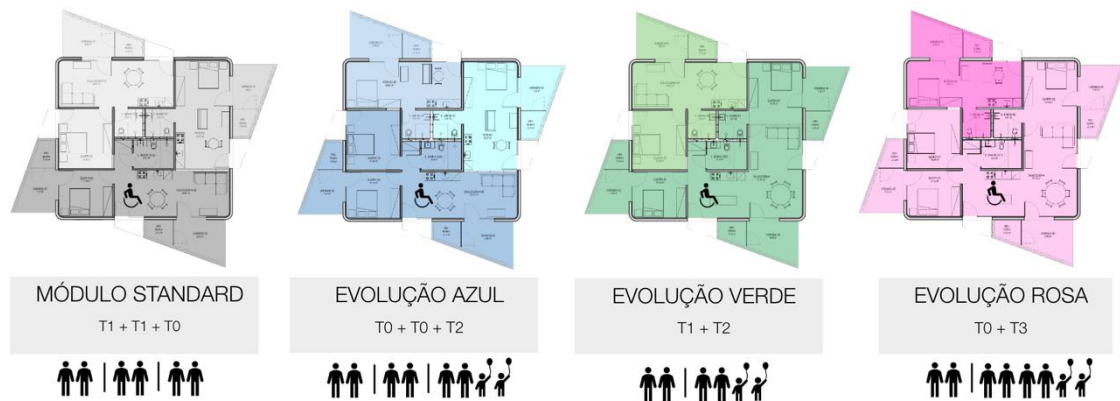


Figura 20 - Variação tipológica evolutiva Fonte: Autora

A cobertura pré-fabricada, as paredes autoportantes de betão impressas em 3D, as paredes modulares e as paredes infraestruturadas das casas de banho, compõem toda gama de fechamentos horizontais e verticais da habitação. Assim sendo, podemos afirmar que todo o processo de construção é industrializado, com exceção das fundações em radier.

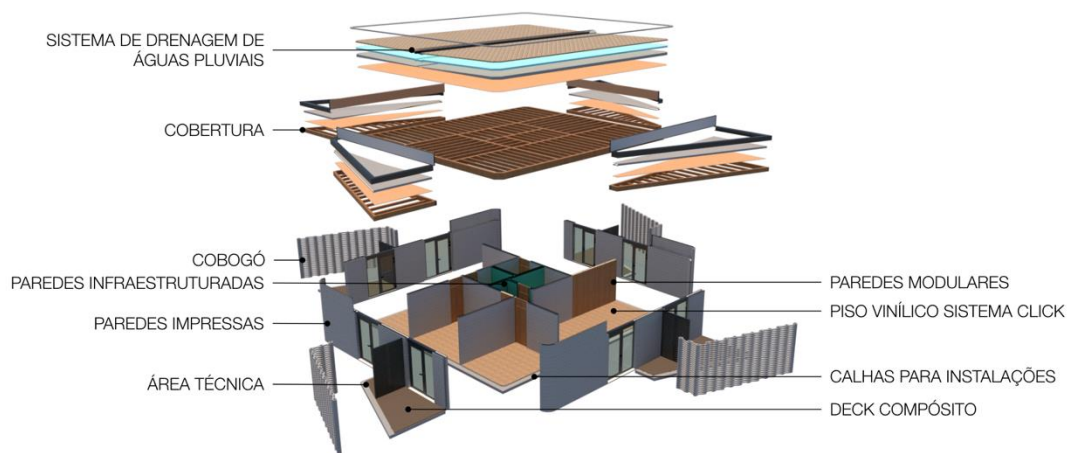


Figura 21 - Perspectiva explodida das soluções construtivas adotadas Fonte: Autora

As paredes infraestruturadas, que fazem a divisão das casas de banho das diferentes tipologias, são pré-fabricadas com acabamento em pintura acrílica e aplicação de revestimento cerâmico somente na área do duche. As paredes modulares são painéis de madeira com isolamento térmico e acústico no seu interior, conformando um painel sanduíche.

O exercício proposto como caso de estudo tem como base o projeto apresentado, que será revisitado considerando a construção industrial como método construtivo. Esse exercício de identificação e redesenho será realizado para os fechamentos verticais exteriores e posteriormente o processo pode ser repetido para os elementos restantes que compõem a edificação, como: divisórias interiores, fundação, piso, teto e caixilharias.

Para efeito de experimentação, considerando que o Projeto Catavento possui um perímetro de 11m por 12m, foi modelado em Revit uma composição de fachada composta por 2 painéis de 12m e 2 painéis de 10,6m engastados nos painéis de 12m, ambos com a espessura de 20cm. Esta foi uma decisão tomada arbitrariamente, de forma a emular uma escolha de projeto que poderia ser considerada por projetistas. A altura dos painéis considerada é de 3m, seguindo a dimensão que havia sido adotada no projeto Catavento.

3.6.2.2 Procedimento

O desenvolvimento da tipologia para representar os painéis, foi realizada no Revit 2025 e teve como ponto de partida a reunião de informações necessárias para compor esse novo tipo, criado a partir da família *Basic Wall*. Com base em entrevistas e visita à fábrica da KREAR, verificou-se que os painéis possuem dimensões máximas de 3,6 metros de altura por 13,70 metros de comprimento e dimensões mínimas de 0,4m de comprimento por 0,4m de altura. Os valores máximos são definidos pela dimensão máxima das mesas de produção utilizadas em fábrica. Os valores mínimos têm ligação com os chamados *shelters*, estruturas metálicas posicionadas sobre as mesas por braços robóticos que compõem os limites dos painéis.

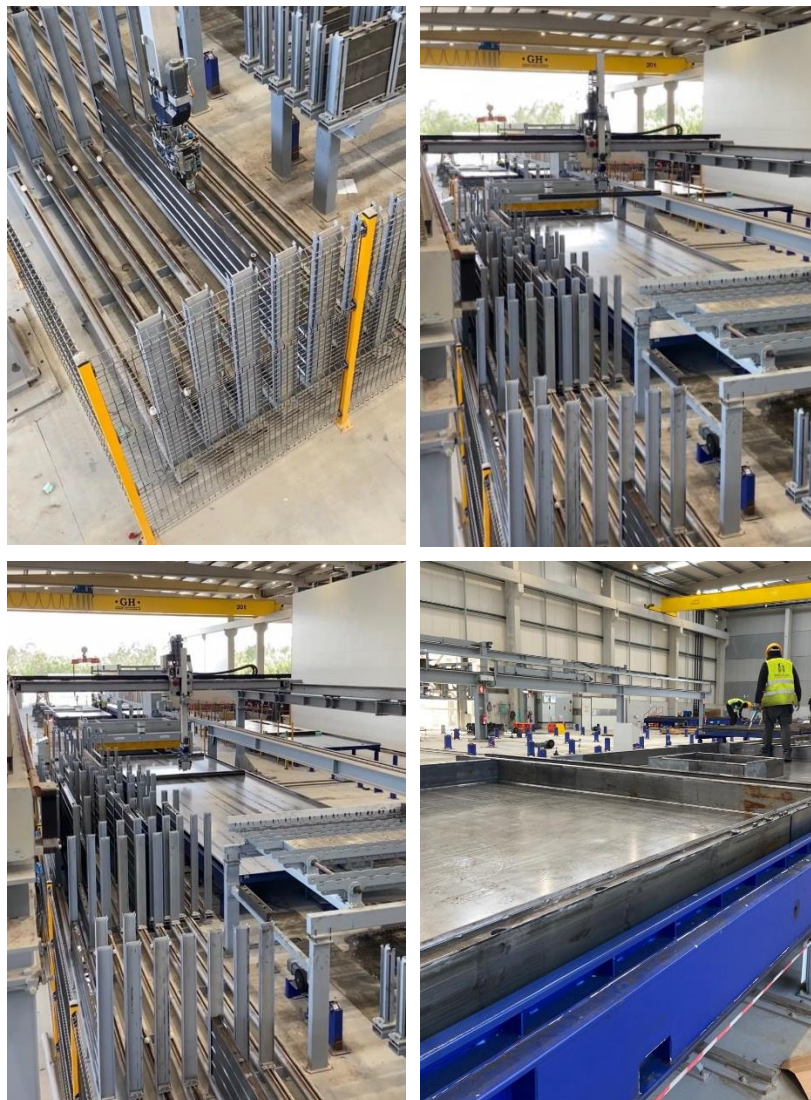


Figura 22 - Montagem de *shelters* em fábrica Fonte: Autora

Atualmente, a KREAR produz apenas painéis estruturais com espessura de 20 cm. Embora exista a intenção de disponibilizar painéis de 25 cm no futuro, essa solução ainda não integra o catálogo da empresa; por esse motivo, apenas a espessura de 20 cm foi considerada nesta investigação. Quanto à escolha da categoria base para o desenvolvimento do painel, optou-se pela utilização da família *Basic Wall*. Essa decisão deve-se ao fato de que a *Basic Wall* parece oferecer maior liberdade de manipulação geométrica e melhor compatibilidade com o comportamento paramétrico necessário para o projeto.



Figura 23 - Dimensões máximas para painéis Fonte: Autora

Os parâmetros trabalhados no tipo correspondem a informações como: taxa de armadura de aço; preço do aço e preço do betão. Essas informações são fixas e não editáveis. As dimensões variam, alterando dados como volumetria e peso também associados ao tipo. Dessa forma é possível extrair a precificação de materialidade diretamente do modelo, através da tabela de cálculo de material associada à tipologia. Após associar as informações ao tipo, foi modelado manualmente a chamada Fachada 01, que constitui a primeira composição a ser considerada para precificação e posterior análise. A precificação da materialidade e às restrições para transporte serão mais desenvolvidas nos capítulos a seguir.

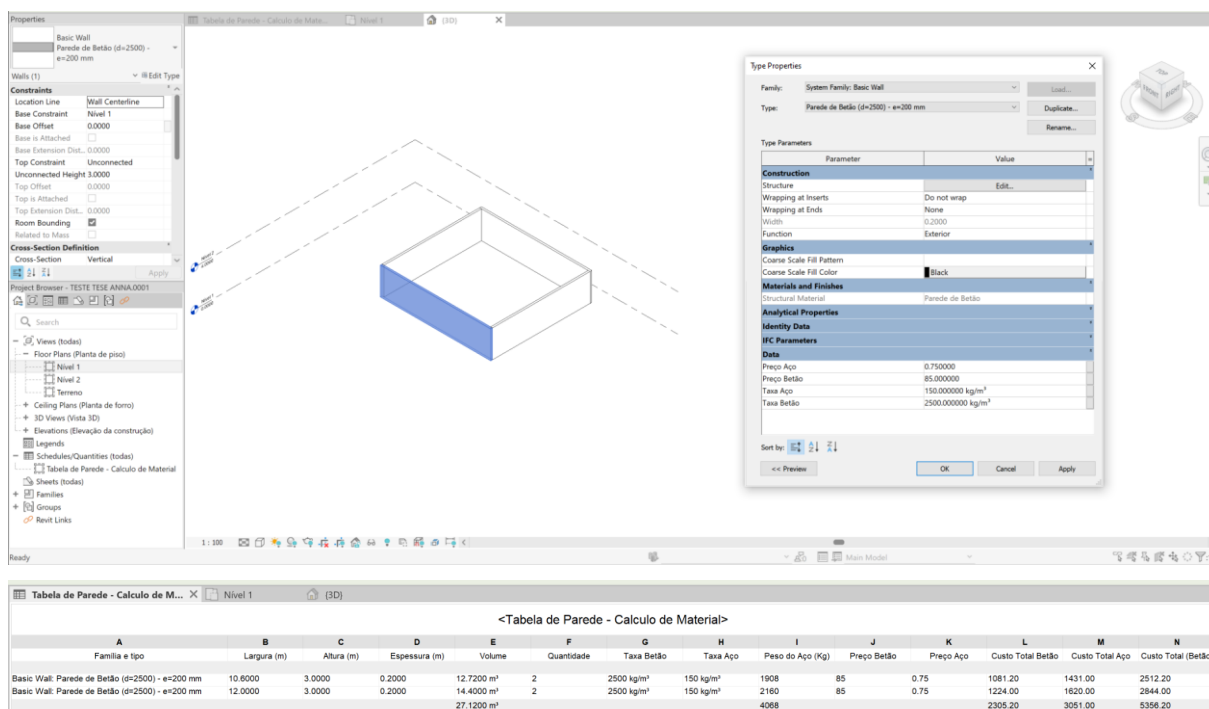


Figura 24 - Composição da Fachada 01, propriedades de tipo e tabela de cálculo do custo da materialidade Fonte: Autora

3.6.2.3 Precificação do Material

A precificação da materialidade resulta da combinação entre o preço unitário dos materiais principais — nomeadamente betão (€/m³) e aço (€/kg) — e a quantidade de material necessária. Para chegar ao custo total da materialidade, foi necessário calcular separadamente o custo total do betão e o custo total do aço. A precificação do betão armado foi realizada considerando a classe de resistência C30/37. Se tratando de painéis estruturais, o preço por m³ considerado foi de 85€/m³. Este é o preço corrente no ano de 2026 para o tipo de betão considerado, de acordo com o Engenheiro António Carreira da empresa KREAR. O preço do aço em €/kg e a taxa da armadura para parede estrutura, em kg/m³, também foram informados pelo Engenheiro António, durante a consultoria. É importante mencionar que a precificação do material nesta primeira etapa, não inclui o valor da mão de obra de produção, que será tratado em mais detalhes adiante, no subcapítulo 3.6.5.4. Isto significa objetivamente que o custo da materialidade, considerado como parâmetro no Revit, não possui o acréscimo do custo da mão de obra de produção.

3.6.2.4 Restrições de Transporte

Segundo o Regulamento de Autorizações Especiais de Trânsito (RAET), o Decreto-Lei n.º 132/2017 e a Portaria n.º 274/2021, os limites máximos para o transporte rodoviário, com ou sem autorização especial, variam conforme o tipo de veículo e a natureza da carga. Sem necessidade de autorização, os veículos podem ter até 4,00 metros de altura, 2,55 metros de largura (ou 2,60 metros no caso de veículos refrigerados ou de transporte intermodal) e projeções até 0,55 metros à frente e 0,45 a 1,00 metro atrás, conforme o tipo de carroçaria.

O comprimento máximo permitido para veículos simples é de 12,00 metros e o peso bruto máximo permitido é de 25 toneladas. Limites superiores de dimensão e peso são possíveis mediante autorização especial, mas o presente caso de estudo, considera os limites para veículos simples expostos anteriormente. Por este motivo, apesar da mesa em fábrica ser capaz de produzir painéis de até 13,70m, o projeto em questão considera 12m como comprimento máximo possível, para minimizar custos mais elevados com transporte. O peso também fica restrito ao máximo de 25 toneladas.

3.6.2.5 Resultado

A partir do levantamento técnico realizado junto à empresa KREAR, foi possível estruturar uma tipologia específica para painéis estruturais em ambiente Revit. O desenvolvimento do tipo permitiu consolidar, num único elemento, informações relacionadas a volumetria, ao peso e a parâmetros de custo associados ao betão e ao aço. Este processo confirma o potencial do BIM enquanto sistema de gestão integrada da informação, permitindo antecipar dados quantitativos relevantes ainda durante a fase de conceção, conforme discutido por (Lu et al. 2017).

A Fachada 01 é a primeira fase do Caso de Estudo e constitui a composição manual da envolvente exterior do Projeto Catavento, considerando painéis pré-fabricados de grandes dimensões, a geometria proposta respeitou simultaneamente as limitações produtivas da fábrica e as restrições impostas pelo transporte rodoviário nacional. Entre os resultados obtidos na Etapa 1 do caso de estudo, o mais relevante foi a obtenção automática do preço total da geometria através da tabela de quantidades associada ao modelo BIM.

A parametrização dos custos do betão C30/37 e da armadura de aço permitiu extrair, em tempo real, o custo total da materialidade da solução proposta. Este aspeto aproxima-se das abordagens de DFMA (*Design for Manufacture and Assembly*) discutidas por (Yuan et al. 2018), nas quais o modelo digital deixa de representar apenas a geometria da edificação e passa a incorporar condicionantes produtivas e de montagem.

Apesar dos avanços obtidos, a etapa ainda não permite afirmar se a solução manualmente modelada corresponde à alternativa economicamente mais eficiente. A Fachada 01 representa apenas uma configuração inicial arbitrariamente definida, sem aplicação de métodos automatizados de otimização geométrica ou análise generativa. Assim, os resultados desta etapa devem ser compreendidos como o primeiro passo para posterior análise a ser desenvolvida Etapa 3 da investigação.

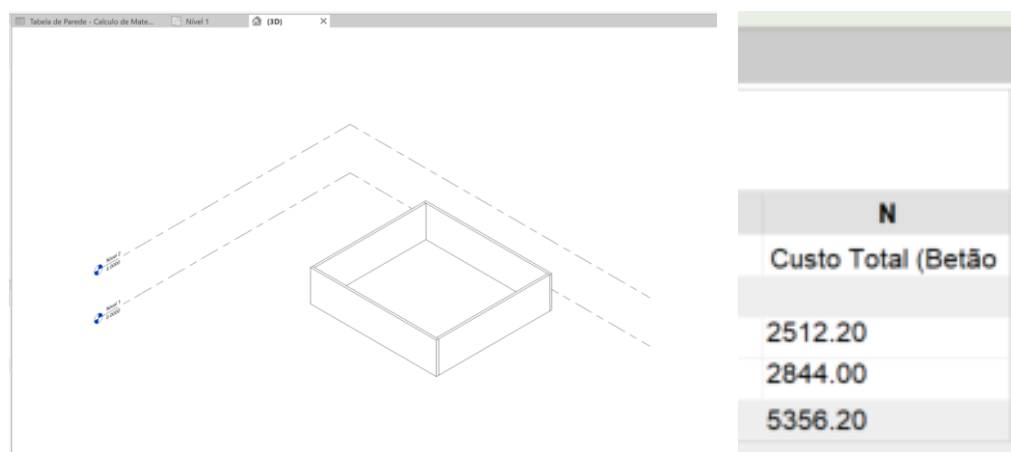


Figura 25 - Custo total em € da Fachada 01 Fonte: Autora

A Etapa 1 do caso de estudo demonstrou que o ambiente Revit pode ser utilizado não apenas como ferramenta de representação geométrica, mas também como plataforma de gestão integrada de informação construtiva e económica. A incorporação de parâmetros relacionados a materialidade e ao custo evidenciou o potencial da ferramenta para antecipar constrangimentos reais da construção industrializada. Do ponto de vista construtivo, por exemplo, verificou-se que a adoção de painéis pré-fabricados de grandes dimensões exige compatibilização constante entre limitações produtivas e restrições logísticas. A definição do comprimento máximo de 12m demonstrou que decisões geométricas não podem ser tomadas exclusivamente com base nas capacidades fabris, devendo considerar igualmente os impactos associados ao transporte e à montagem.

A principal vantagem da utilização do Revit com dados de custo e materialidade incorporados reside na capacidade de transformar o modelo digital em uma ferramenta ativa de apoio à decisão projectual, e não apenas em um instrumento de representação geométrica. Em um modelo convencional, sem parâmetros associados a custos e quantitativos, qualquer alteração geométrica exige a realização manual de novos cálculos de volumetria, peso e orçamento. Esse processo tende a ser mais lento, suscetível a erros e dependente de sucessivas verificações externas em folhas de cálculo ou softwares complementares. Além disso, existe uma fragmentação entre projeto e orçamento, dificultando a compreensão imediata do impacto económico das decisões arquitetónicas e construtivas.

Em contraste, no modelo desenvolvido em Revit, a informação paramétrica permite que qualquer alteração na geometria dos painéis, como comprimento, altura ou número de elementos, atualize automaticamente os quantitativos e o custo total. Dessa forma, o projetista consegue visualizar instantaneamente as consequências económicas de cada decisão de projeto, estabelecendo uma relação direta entre forma, produção e custo. Essa integração apresenta maior compatibilidade com processos DFMA, integra projeto, fabrico e logística e garante maior rapidez e precisão orçamental nas fases preliminares.

Além disso, essa abordagem permite antecipar problemas ainda durante o desenvolvimento do projeto, reduzindo retrabalho e aumentando a previsibilidade do processo construtivo. Conforme discutido por (Lu et al. 2017), o BIM possibilita utilizar dados integrados ao longo do ciclo de vida da edificação, favorecendo análises quantitativas e suporte à decisão. Assim, o modelo BIM deixa de ser apenas representativo e passa a funcionar como um sistema capaz de auxiliar na procura por soluções economicamente mais eficientes. Por fim, conclui-se que esta etapa inicial estabelece uma base consistente para o desenvolvimento das fases subsequentes da investigação, nas quais métodos de otimização generativa poderão ser aplicados para comparar as composições de fachada propostas e identificar soluções mais eficientes do ponto de vista económico.

3.6.3 Etapa 2

A Etapa 2 se inicia com a elaboração da fórmula de custo e se encerra com a criação de uma nova proposta para fachada, chamada fachada 02. O processo se inicia a partir do desenvolvimento de um algoritmo no Grasshopper, estruturado a partir da organização de informações em componentes conectados, dispostos segundo uma sequência lógica de operações. Este algoritmo origina uma geometria base que será submetida ao processo de otimização conduzido integralmente pelo Galápagos, com o objetivo de minimizar o custo final. A fachada 02 será então exportada para o Revit para posterior comparação com a fachada 01 - elaborada na etapa anterior - em ambiente BIM.

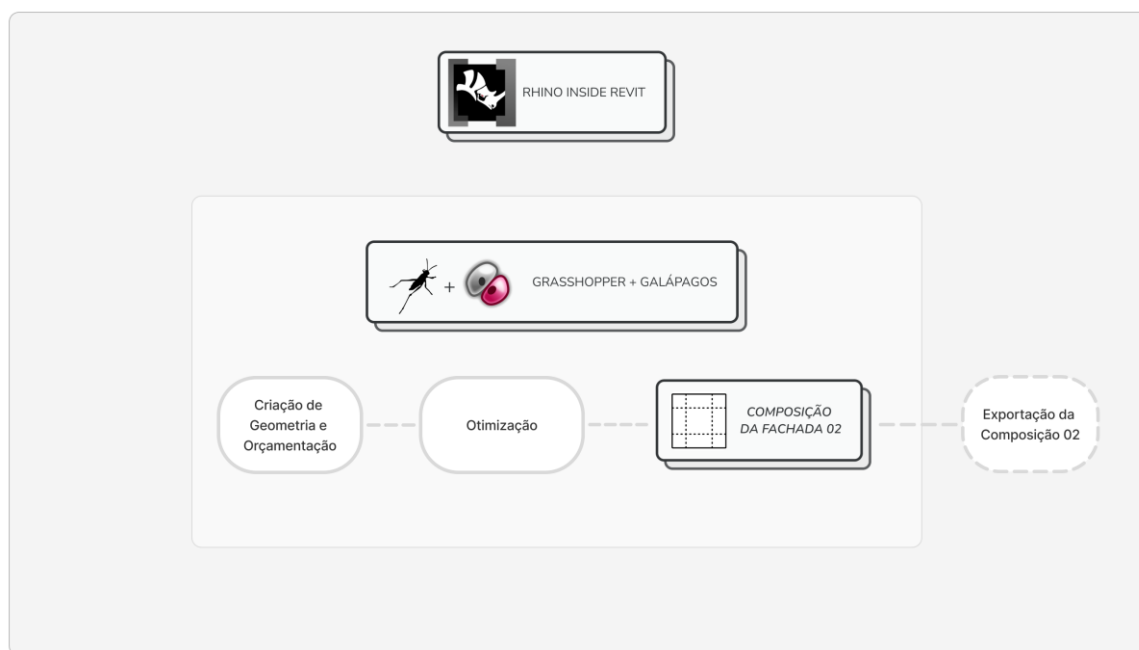


Figura 26 - Etapa 2 do plano de ação experimental Fonte: Autora

O objetivo deste plano de trabalho é testar de forma prática a interoperabilidade entre os softwares, chegando à geometria com o menor custo total. Os resultados desta etapa irão demonstrar se as ferramentas digitais podem contribuir nas decisões de projeto, auxiliando os projetistas de HCC a tomar decisões baseadas em dados de custos, ainda durante a concepção arquitetônica.

3.6.3.1 Introdução à Precificação

Para elaborar a estimativa do custo total dos painéis, leva-se em consideração quatro variáveis, são elas respectivamente: logística, montagem, materialidade e mão de obra. As duas primeiras variáveis fazem parte do processo de montagem e as duas últimas do processo de fabrico. O diagrama a seguir mostra resumidamente a estruturação da fórmula de custo e como as suas variáveis são compostas, considerando valores fixos, como a distância entre a Laso, a KREAR e o Terreno, e valores que mudam conforme as dimensões e a quantidade de painéis, como a quantidade de viagens.

A incorporação das variáveis citadas na fórmula de custo permitirá uma estimativa mais assertiva e próxima da realidade, além disso essa estratégia segue as recomendações práticas do *Riba Plan of Work*, que aconselha que o controle de custos esteja incorporado desde as decisões iniciais de projeto. A incorporação de uma base de dados de custos vinculada à geometria, possibilita que qualquer alteração de projeto atualize também o plano de custos, o que vai de encontro com as etapas 3 e 4 do *Riba Plan of Work*.

Na etapa 3 do *Riba Plan of Work*, relativa à coordenação espacial, as decisões relacionadas à estratégia construtiva, o que inclui aspetos de logística, montagem e requisitos de fabricação, são consolidadas em nível suficiente para permitir o avanço seguro ao detalhamento técnico. Já a etapa 4, que se trata do Projeto técnico, compreende o desenvolvimento completo das informações necessárias à fabricação e construção, definindo detalhes construtivos e especificações que viabilizam a produção dos elementos pré-fabricados.

Dessa forma, pode-se dizer que o projeto aplica os princípios de DfMA mencionados no *RIBA*, ao integrar informação técnica e geométrica em ambiente digital, assegurando que as decisões de projeto referentes à modelagem estejam diretamente associadas às exigências de fabricação, transporte, montagem e custos ainda fases iniciais de projeto, respondendo prontamente às etapas 3 e 4 do *RIBA Plan of Work* citadas no parágrafo anterior.

A seguir serão apresentadas todas as variáveis consideradas para precificação, com exceção da variável “materialidade” que já foi apresentada anteriormente no subcapítulo 3.6.4.4. A elaboração adequada dos custos, incluindo mão de obra, logística e montagem é fundamental para chegar a um valor total de custo o mais realista possível, e todo o desenvolvimento da precificação de cada uma das variáveis será apresentado nos capítulos a seguir.

3.6.3.2 Logística

No que se refere à variável logística (a), esta é definida a partir de três componentes fundamentais: a quantidade de viagens necessárias, consoante ao peso da carga, a distância entre o local de fabrico, a transportadora e o terreno – que compõe o percurso mínimo explicado em mais detalhes no próximo parágrafo - e o custo em €/km cobrado pela transportadora. A logística reflete diretamente os constrangimentos associados ao transporte de elementos pré-fabricados, os quais constituem um fator crítico na construção modular, dado que dimensões e pesos influenciam significativamente a viabilidade económica do sistema (Pessoa et al. 2026).

O percurso mínimo necessário citado anteriormente consiste no caminho mínimo que o camião precisa percorrer para entregar os painéis no local de obra. O percurso em questão se inicia na transportadora de origem do camião, que para o caso de estudo está sendo considerado a empresa LASO, atual parceira da KREAR, localizada em Cacia, Aveiro. Após carregar o camião na fábrica com auxílio das vigas de rolamento, o camião vai até o terreno de destino para descarregar os painéis e iniciar a montagem. Após descarregar todo conteúdo, o camião retorna a fábrica para realizar uma segunda viagem, ou volta para a transportadora de origem. Neste caso de estudo o terreno considerado localiza-se em Alcácer do Sal e o percurso mínimo totaliza 658 km. Neste percurso, a distância entre a empresa KREAR, localizada em Pardilhó e o terreno de destino é de 325 km.



Figura 28 - Percurso mínimo necessário Fonte: Autora

É importante, entretanto, considerar que deve ser adicionado 650 km ao percurso total para cada viagem a mais realizada. Esta distância deriva do percurso do camião que ao fazer uma viagem a mais, precisa voltar a KREAR e depois retornar ao terreno, percorrendo a distância de 325 km duas vezes. Para fins de comparação, a extensão máxima entre o ponto mais a norte (região de Melgaço) e o ponto mais a sul (região de Vila Real de Santo António) de Portugal é da ordem de 560 km. Ao realizar um percurso mínimo e duas viagens a mais, a distância total é de 1958km. Com esta distância é possível contornar o país de norte a sul aproximadamente três vezes e meia. Este fato acabou por resultar em um preço de logística muito acima do habitual.

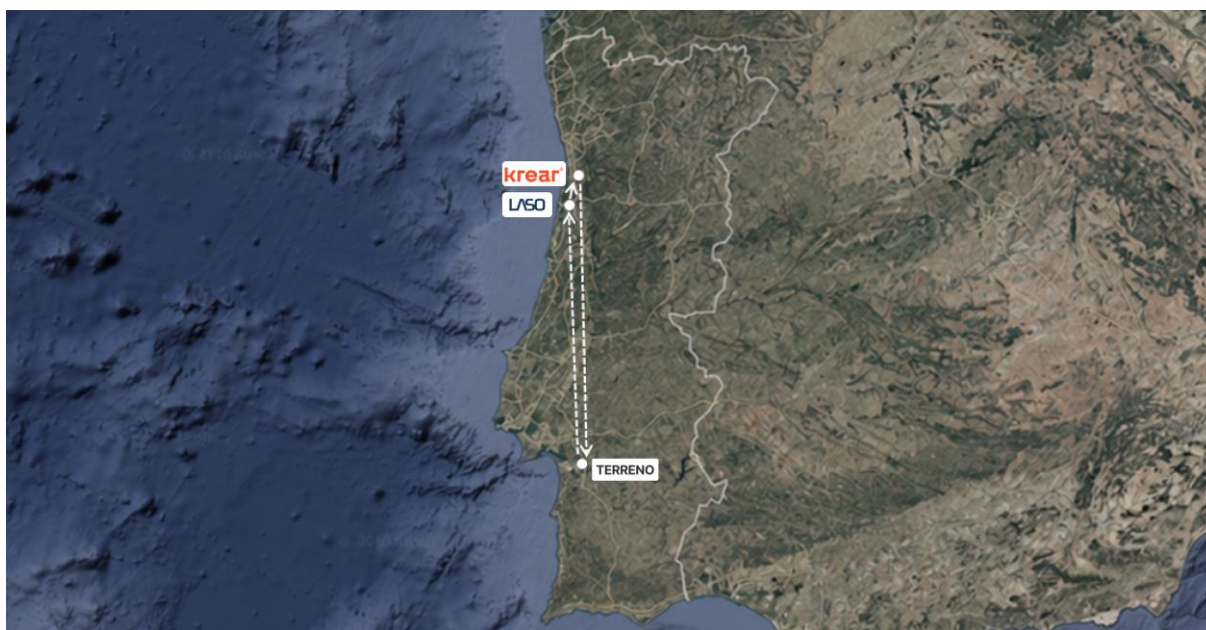


Figura 29 - Percurso mínimo considerando a transportadora LASO como ponto de partida e destino final Fonte: Autora

Para calcular o custo estimado da logística considerando o percurso acima, foram feitas consultorias com o Engenheiro António Carreira da empresa KREAR. Nestas consultorias foram verificadas algumas informações, como: a densidade a ser considerada para o cálculo do peso dos painéis em betão – 2500 kg/m³; o tipo de camião mais adequado para transportar os painéis estruturais por distâncias acima de 50km – camião *Flatbed* -; o preço por km cobrado pela transportadora – 3€/km - e o peso máximo que o camião pode transportar dispensando autorização especial – 25 toneladas. Com todas as informações reunidas, foi possível calcular o custo total da logística considerando as dimensões dos painéis. A logística é um fator determinante no caso de estudo e reforça a relevância do algoritmo, que pode ajudar a encontrar a configuração mais barata para tentar compensar o alto valor logístico, diminuindo o custo em outros aspetos, como na mão de obra, por exemplo.

3.6.3.3 Mão de Obra

Quanto ao cálculo da variável mão de obra (d), este considera os trabalhos relacionados ao betão e ao aço, além, é claro, das dimensões totais dos painéis, o que inclui volume, área, peso e quantidade de painéis. Além disso, após entrevista com Engenheiro António Carreira, percebeu-se a necessidade de considerar o chamado cálculo de rendimento de produção para estimar o custo da mão de obra. Podemos dizer então que a mão de obra é determinada a partir do número de trabalhadores, do tempo de trabalho, do custo horário por trabalhador e, criticamente, do rendimento de produção.

Este último parâmetro introduz uma dimensão produtiva que relaciona diretamente a capacidade de fabrico com o comprimento dos painéis. A associação entre as informações mencionadas – grandezas fixadas - e as dimensões dos painéis – grandezas variáveis - resulta no valor de horas homem por m², que por sua vez leva ao custo total da mão de obra. Abaixo segue tabela do rendimento de produção dos painéis considerado no cálculo.

Tabela 6 - Rendimento de produção

Comprimento dos painéis	Rendimento de Produção
10m – 14m	3 painéis por dia
7m – 9,9m	5 painéis por dia
5m – 6,9m	7 painéis por dia
0,4m – 4,9m	10 painéis por dia

Se faz necessário mencionar que foi cogitado inicialmente abranger na pesquisa o chamado cálculo de aproveitamento das mesas de produção, criado em Python. Este código gerava como resultado o número de mesas que eram necessárias para produzir uma determinada quantidade de painéis com determinada dimensão, buscando sempre a maior percentagem de aproveitamento de mesa possível. Entretanto, posteriormente esta variável foi excluída devido a introdução do rendimento de produção, entendido como o número de painéis produzidos por unidade de tempo.

Adicionalmente, é importante mencionar que o objetivo da investigação se centra na otimização de custos em fases iniciais de projeto, e não na otimização do processo de fabrico. Neste enquadramento, a inclusão do aproveitamento das mesas introduziria um nível de complexidade mais adequado a estudos voltados para a melhoria da eficiência de processos industriais. A presente investigação, exclui então o cálculo de aproveitamento de mesa como parte de uma decisão metodológica consciente, mantendo somente variáveis adequadas aos objetivos da investigação.

3.6.3.4 Montagem

A variável montagem (b) não foi aprofundada nesta pesquisa por se tratar de uma variável de elevada complexidade, cuja análise demandaria a participação de uma empresa especializada em montagem, para além da KREAR, que atualmente terceiriza este processo. Por este motivo, a montagem foi considerada como uma percentagem aproximada de 20% sobre o somatório das restantes variáveis — logística (a), materialidade (c) e mão de obra (d). Esta decisão representa uma simplificação deliberada do modelo, assumindo a montagem como uma função dependente dos custos globais do sistema, em vez de um cálculo autónomo e detalhado. Ainda assim, a nível informacional, considera-se a utilização de uma auto grua de 60 toneladas fornecida pela GRUEST, empresa parceira da KREAR, uma vez que, devido às dimensões do Projeto Catavento, não se verifica a necessidade de equipamentos com maior alcance ou capacidade de içamento.

Geralmente são necessários 3 montadores e um manobrista para realizar as montagens. O tipo de grua e o preço do aluguer varia conforme o tamanho e o peso dos elementos a serem içados, assim como à distância máxima de alcance e o posicionamento da auto grua em relação ao que está a ser construído. Existem casos onde alugam-se auto gruas com maior capacidade para montar somente uma pequena porção da edificação, e o resto é tratado com uma auto grua de menor alcance e capacidade de peso de içamento. Além disto, deve se considerar também que o peso do painel é superior ao seu peso em bruto, pois existem forças aplicadas, como o vento, que tornam o painel ainda mais pesado. Todas essas informações são apresentadas para evidenciar a complexidade inerente à precificação da montagem, uma vez que fatores operacionais, logísticos e ambientais influenciam diretamente os custos envolvidos, tornando esta variável excessivamente ampla e complexa para ser aprofundada no escopo da presente pesquisa.



Figura 30 - Exemplo de auto grua

3.6.3.5 Procedimento

Após a obtenção do custo total com base exclusivamente na materialidade, conforme apresentado na tabela de precificação extraída do Revit e descrito no subcapítulo 3.6.2.5, considerando as dimensões inicialmente definidas de forma intuitiva pelo método tradicional, iniciou-se o desenvolvimento da geometria da fachada no Grasshopper. Embora a geometria tenha sido inicialmente modelada no Revit, optou-se por reconstruí-la no Grasshopper em razão da reduzida complexidade do caso de estudo, restrito às fachadas de uma edificação simples, o que facilitou o desenvolvimento e a validação da lógica paramétrica. Ressalta-se, contudo, que, em projetos de maior complexidade, a geometria pode ser importada diretamente do Revit por meio do Rhino Inside Revit, eliminando a necessidade de remodelação. Ao trabalhar na geometria, surgiu então a necessidade de criar algumas regras, ou as chamadas diretrizes, que nortearam a lógica de construção do algoritmo. Segue a lista das diretrizes DfMA consideradas:

- O comprimento máximo dos painéis é 12m: esta diretriz existe devido às limitações e restrições de transporte, visando a economia de custos. Conforme o RAET comprimentos maiores que 12m exigem uma licença especial que encarece a logística.
- O comprimento mínimo dos painéis é 0,4m: esta é a medida mínima possível para fabrico.
- A espessura dos painéis é 0,20m: esta espessura é a mais usual para painéis estruturais. Espessuras de 0,12 não são possíveis para painéis estruturais e de 0,15 não são recomendadas. A espessura de 0,25 é possível, entretanto, no momento, ainda não podem ser fabricadas e por isso foram excluídas como possibilidade. Além disso, trabalhar com espessuras menores diminui os custos.
- A altura dos painéis é 3m: decisão projectual.

As diretrizes seguem fundamentalmente o DfMA, pois significam que as regras de produção são as regras de desenho. Ao restringir o design às regras de produção, restringimos as possibilidades de desenho à capacidade de produção da fábrica. Após a definição das diretrizes deu-se início à construção do algoritmo no Grasshopper, cujo passo a passo do processo segue abaixo.

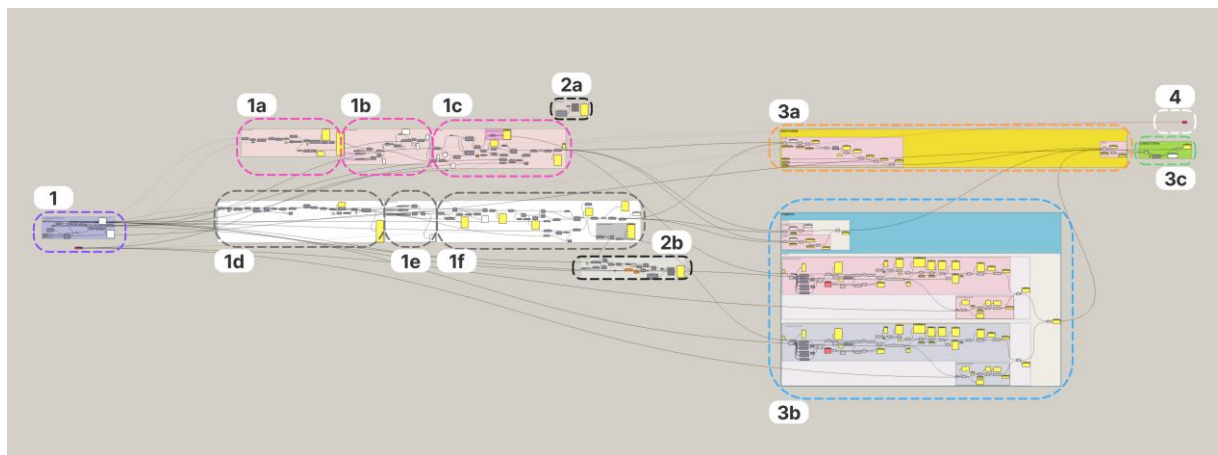


Figura 31 – Diagrama do passo-a-passo da construção do algoritmo no Grasshopper

Passo 1 - Construção da geometria base: este passo se trata da criação da geometria base, com os valores máximos da edificação de 12m x 11m. Estes valores são posteriormente utilizados para a criação das geometrias iniciais que dão origem as fachadas. É importante dizer que as fachadas de 12m são tratadas separadamente das fachadas de 11m. Esta geometria base origina ambas geometrias, de 12m e 11m além de realizar um tipo de “prova real”, através do componente “linear array” para possibilitar verificar ao longo da criação da geometria se o algoritmo está a funcionar adequadamente. O “linear array” também é utilizado posteriormente para fazer testes considerando múltiplos pavimentos e verificar o impacto que esse aumento de escala poderia vir a ter no custo por piso. É válido mencionar que inicialmente a geometria começou a ser desenvolvida considerando que os comprimentos dos painéis deveriam ser múltiplos de 0,4m, para garantir sempre números inteiros. Entretanto, descobriu-se posteriormente durante visita à fábrica da KREAR, que essa preocupação era irrelevante, pois é comum fabricar painéis com números fracionários. Após isto, o algoritmo foi revisitado e chegou-se ao que está apresentado.

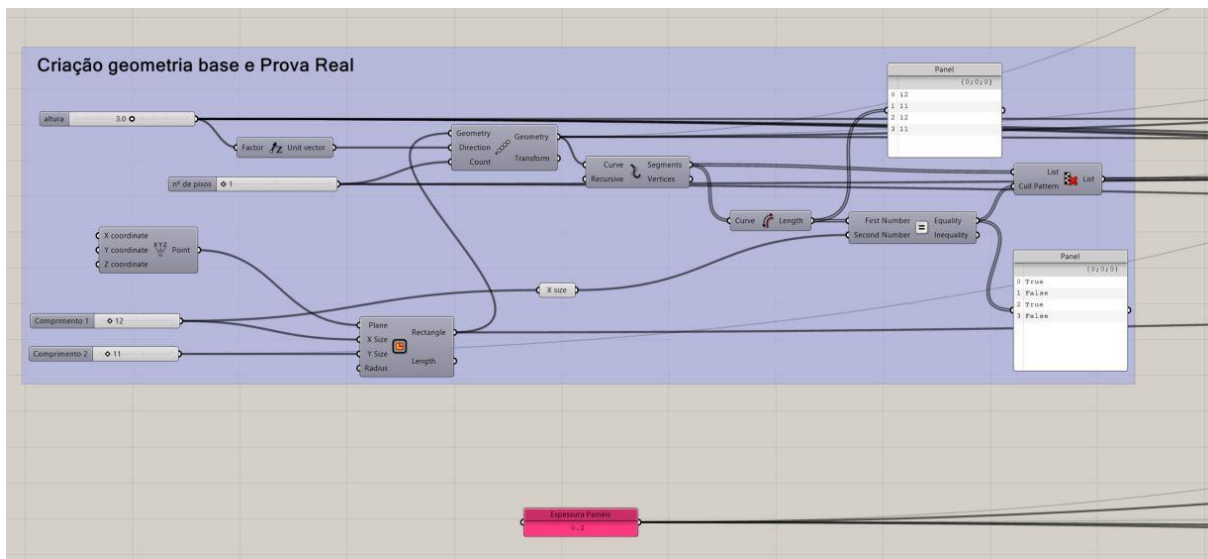


Figura 32 - Passo 1: construção da geometria base

Passo 1a - Criação da geometria inicial das fachadas de 12m: a partir da geometria base, se constrói a geometria inicial das fachadas de 12m. Esta sessão se trata resumidamente da divisão da curva proveniente do comprimento de 12m por 0,4m que é o valor mínimo possível para os painéis. Esta operação gera uma lista que será usada no passo a seguir.

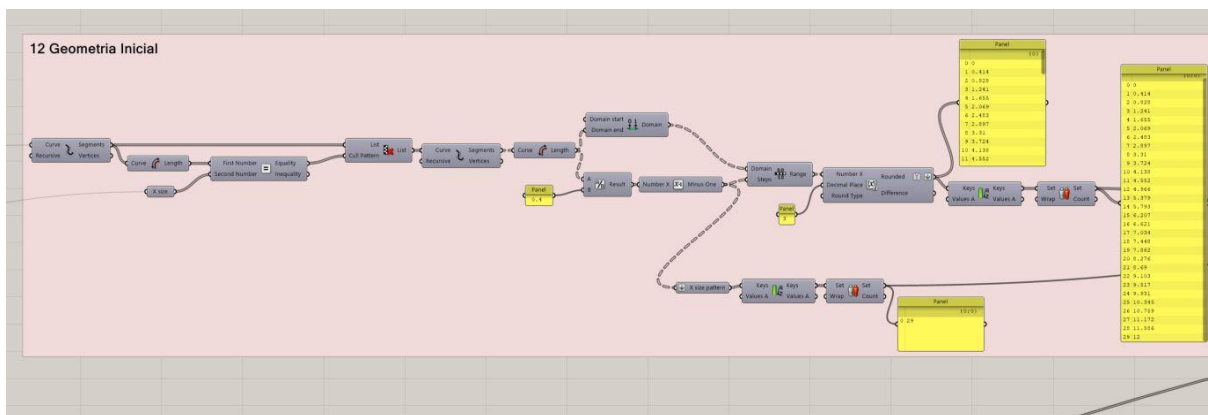


Figura 33 - Passo 1a: criação da geometria inicial das fachadas de 12m

Passo 1b - Randomização das fachadas de 12m: a partir da lista gerada no passo 2, utiliza-se o componente nomeado “Jitter”. Este componente se trata de um operador de reorganização pseudoaleatória de listas, sendo utilizado para introduzir variabilidade controlada sem alterar o conjunto de dados original. O “randomizador” do “Jitter” gera múltiplas alternativas formais a partir de um mesmo conjunto de parâmetros. Este randomizador é um dos genomas trabalhados posteriormente pelo Galápagos. A seguir, o componente “series” gera o segundo genoma a ser trabalhado pelo Galápagos, o “número de linhas de decisão”. O número de linhas de decisão corresponde à quantidade de linhas que divide o seguimento original de 12m. Ao alterar o número de linhas de decisão o galápagos pode dividir a fachada deixando-a com vários painéis ou com um painel apenas.

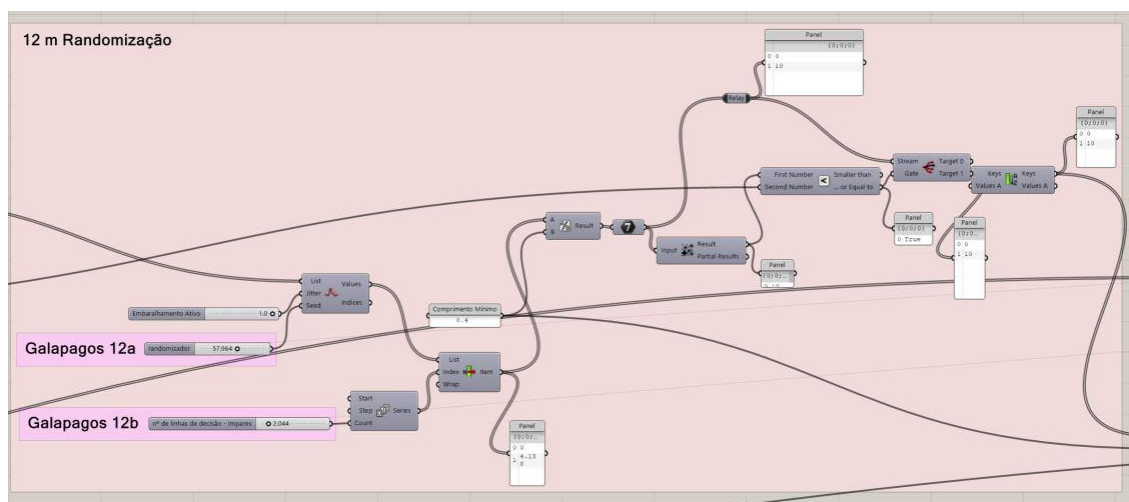


Figura 34 - passo 1b: Randomização das fachadas de 12m

Passo 1c - Construção da geometria final: após a randomização, chegamos a construção da geometria final, que resulta em uma lista com todos os comprimentos dos painéis das fachadas de 12m, provenientes do desenvolvimento dos passos anteriores, e que variam conforme se modifica o randomizador e o número de linhas de decisão comentados acima. A geometria final também resulta em um “brep”, ou seja, um conjunto de superfícies que nos permite visualizar no Rhino as fachadas construídas até então.

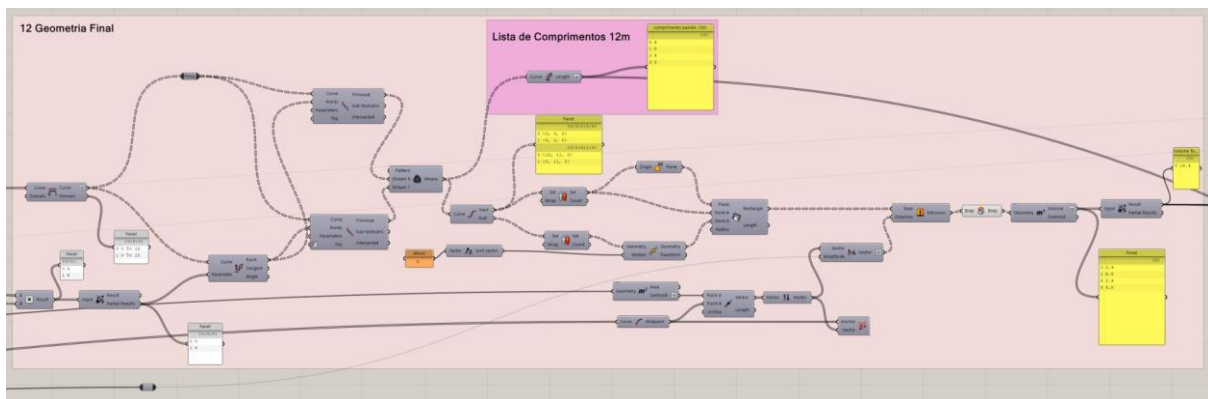


Figura 35 - passo 1c: Construção da geometria final

Passo 1d - Criação da geometria inicial das fachadas de 11m: o comprimento das fachadas de 11m na verdade mede 10,6m e isto é basicamente o que este passo executa. A fachada de 11m engasta nas paredes das fachadas de 12m e, portanto, é necessário subtrair 0,20m de cada extremidade, resultando no comprimento de 10,6m. Para manter a referência ao tamanho original, seguiremos chamando as fachadas de 10,6m de fachadas de 11m.

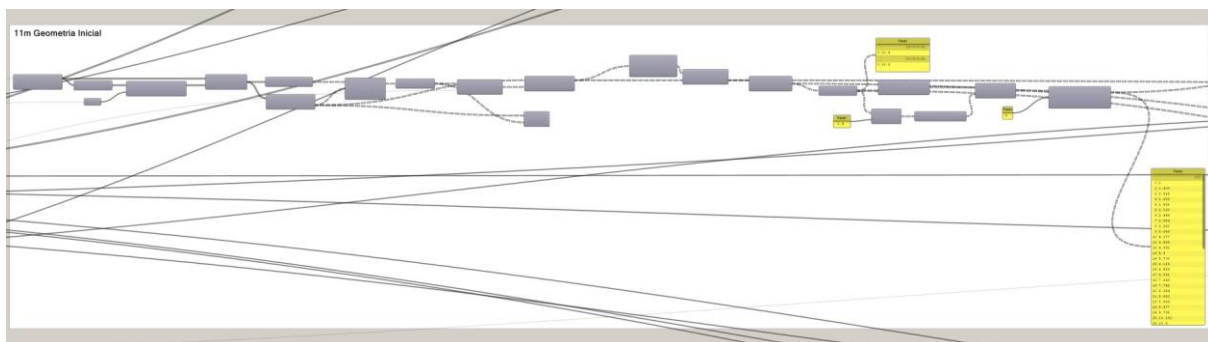


Figura 36 - Passo 1d: criação da geometria inicial das fachadas de 11m

Passo 1e - Randomização das fachadas de 11m: a partir da lista gerada no passo 1d, resultante da divisão da curva proveniente do comprimento de 10,6m por 0,4m que é o valor mínimo possível para os painéis, segue-se o mesmo passo a passo realizado para a randomização dos painéis de 12m. Utilizamos os componentes “Jitter” e “series” cujos inputs são o randomizador e o número de linhas de decisão respectivamente. Ambos inputs são genomas do galápagos, que serão alterados posteriormente pelo *add-on* para gerar múltiplas alternativas formais.

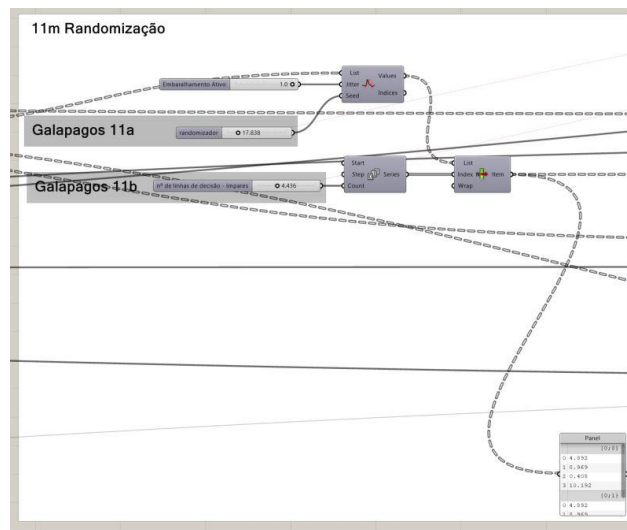


Figura 37 - Passo 1e: randomização das fachadas de 11m

Passo 1f - Construção da geometria final das fachadas de 11m: assim como nas fachadas de 12m, após a randomização, chegamos a construção da geometria final, que resulta em uma lista com todos os comprimentos dos painéis das fachadas de 11m, provenientes do desenvolvimento dos passos anteriores, e que variam conforme se modifica o randomizador e o número de linhas de decisão. A geometria final também resulta em um “*brep*”, ou seja, um conjunto de superfícies que nos permite visualizar no Rhino as fachadas construídas até então.

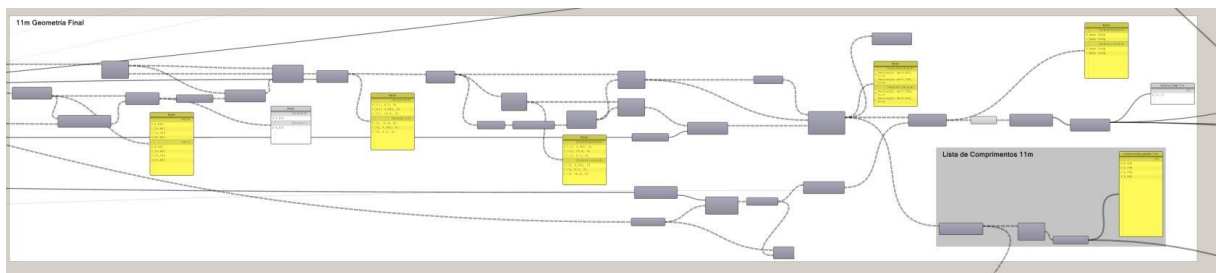


Figura 38 - Passo 1f: construção da geometria final das fachadas de 11m

Passo 2a - Construção da geometria no Revit das fachadas de 12m: após a finalização do algoritmo referente a geometria dos painéis de 12m, através do Rhino Inside Revit, a geometria do Grasshopper foi exportada para o Revit.

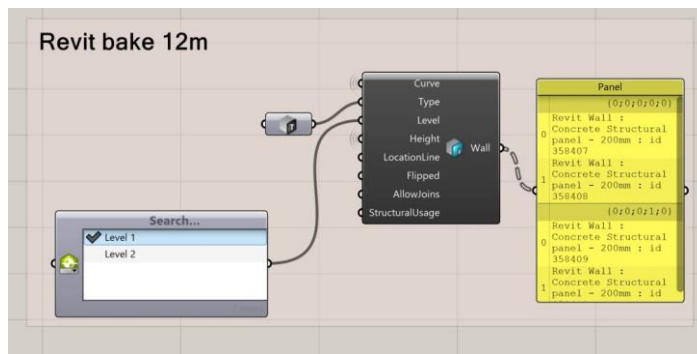


Figura 39 - Passo 2a: construção da geometria no Revit das fachadas de 12m

Passo 2b - Construção da geometria no Revit das fachadas de 11m: após a finalização do algoritmo referente a geometria dos painéis de 11m, através do Rhino Inside Revit, a geometria do Grasshopper foi exportada para o Revit.

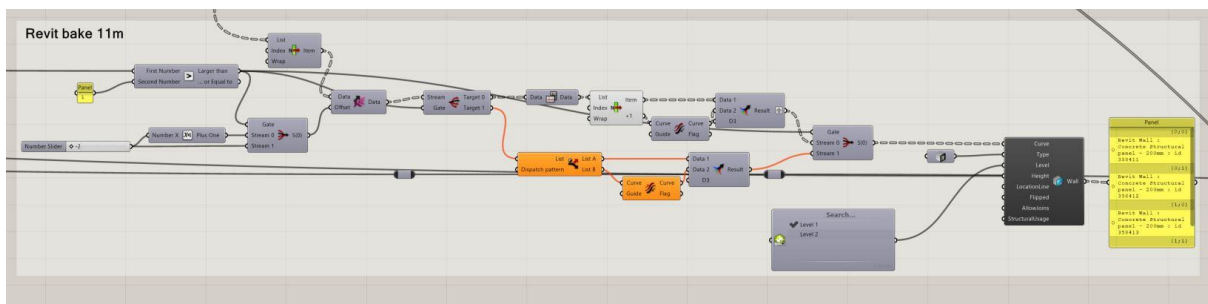


Figura 40 - Passo 2b: construção da geometria no Revit das fachadas de 11m

Passo 3a, 3b e 3c - Orçamentação da edificação: a orçamentação de todos aspetos relacionados ao fabrico e a montagem, nomeadamente: o preço da materialidade, da mão de obra, da logística e da montagem foram calculados a partir da geometria, chegando então a um custo total (3c). No código, tudo que está em amarelo (3a) corresponde ao processo de montagem e o que está em azul (3b) corresponde ao processo de fabrico.

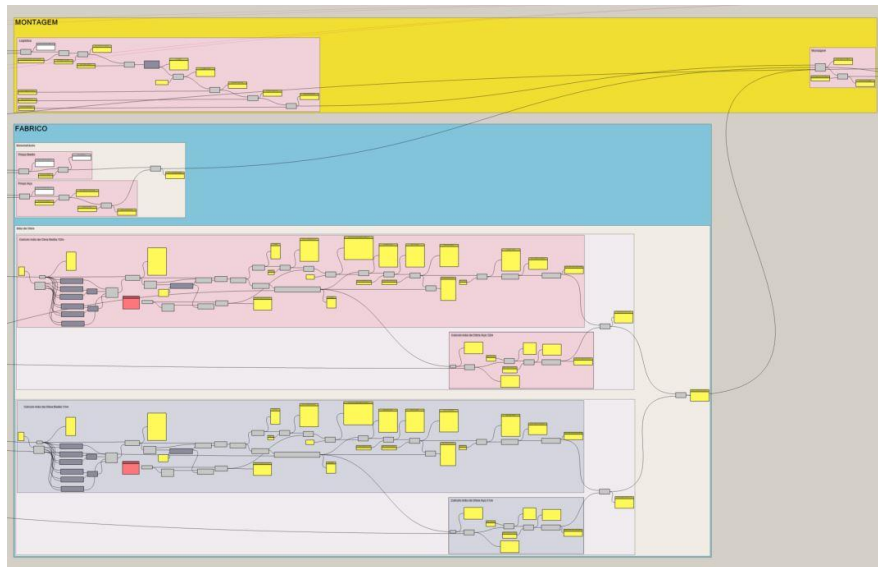


Figura 41 - Passo 3a: montagem (montagem e logística) e Passo 3b: fabrico (materialidade e mão de obra)

Passo 4 - Galápagos: por fim, o Galápagos, enquanto solucionador evolutivo integrado ao ambiente Grasshopper, é utilizado para identificar as soluções com melhor desempenho de custo. O *add-on* é então executado, considerando como genoma os já citados randomizadores e números de linhas de decisão de ambos painéis de 12m e 11m. O Fitness por sua vez foi conectado ao custo total, resultado do passo 3c, e configurado para minimizar o fitness, ou seja, para atingir o menor custo total possível. Após a execução do algoritmo, os dados referentes às geometrias iniciais e às variações geradas pelo *add-on* são organizados e exportados para uma folha de cálculo, para permitir análise comparativa. A seguir será apresentada uma explicação mais detalhada dos testes realizados a partir do galápagos para verificar se o *add-on* de fato resulta em geometrias otimizadas do ponto de vista do custo total.

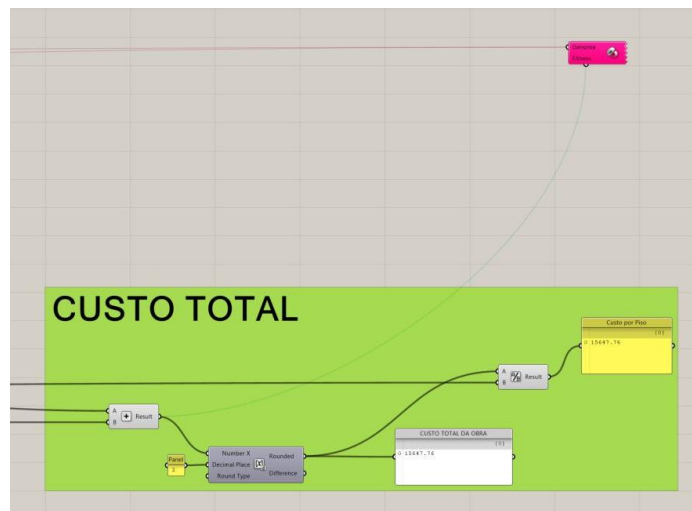


Figura 42 - Passo 3c e 4: custo total e Galápagos

O procedimento do passo 4, exposto resumidamente acima, é composto por 3 testes ao total. O primeiro teste considera como geometria inicial painéis com 12m e painéis com 10,6m. As variáveis são alteradas manualmente para chegar a esta composição e os resultados dos custos são registrados. A seguir, o galápagos é utilizado gerando uma nova geometria a partir da geometria inicial, cujos resultados dos custos também são registrados, possibilitando análise posterior entre ambas soluções, uma elaborada manualmente e outra utilizando o algoritmo.

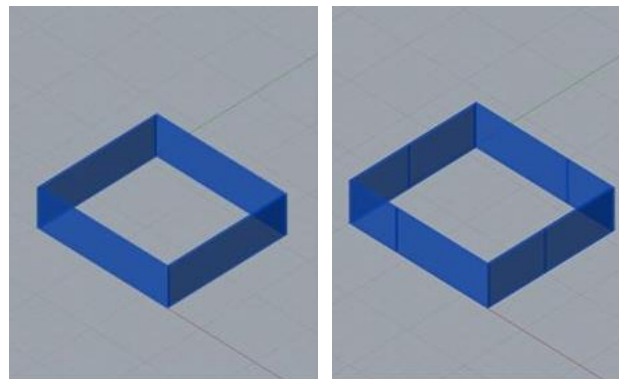


Figura 43 - Resultado do teste 1 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos

O segundo teste considera como geometria inicial os painéis de 12m e de 10,6m divididos ao meio. As variáveis são alteradas manualmente para chegar a esta composição e os resultados dos custos são registrados. A seguir, o galápagos é utilizado gerando uma nova geometria a partir da geometria inicial, cujos resultados dos custos também são registrados, possibilitando análise posterior entre ambas soluções, uma elaborada manualmente e outra utilizando o algoritmo.

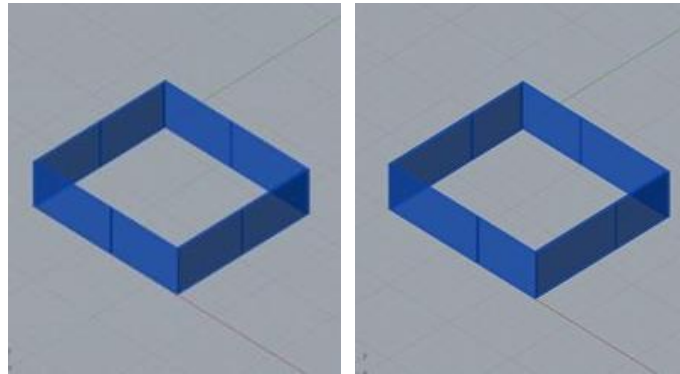


Figura 44 - Resultado do teste 2 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos

O terceiro teste considera a geometria mais eficiente obtida nos testes anteriores, mas desta vez são considerados cinco pisos ao invés de um. Desta forma podemos verificar se o custo por piso se altera ou continua igual. Os resultados dos custos são registrados e o galápagos também é utilizado a seguir, gerando uma nova geometria desta vez com 5 pisos. Os resultados também são registrados para análise posterior.

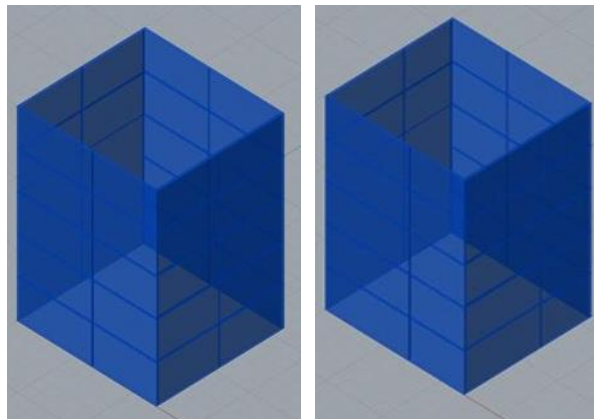


Figura 45 - Resultado do teste 3 feito manualmente e depois utilizando o Galapagos

3.6.3.6 Resultado

Antes de revelar os resultados em si, é importante mencionar que os valores apresentados neste e nos próximos capítulos não correspondem aos montantes reais do orçamento elaborado. Em virtude de questões de confidencialidade e proteção de informação comercial da empresa KREAR, os valores originais — obtidos a partir de um modelo de orçamentação desenvolvido com base em dados recolhidos em entrevistas com representante da empresa — foram anonimizados e convertidos para uma escala adimensional compreendida entre 0 e 1. Nesta escala, o valor 1 corresponde ao custo total da proposta mais cara, obtido no Teste manual 1, apresentado anteriormente no capítulo 3.6.3.5. Assim, os resultados apresentados nas secções seguintes recorrem exclusivamente a estes valores normalizados, preservando-se, contudo, as relações proporcionais entre as diferentes soluções analisadas. A interpretação e discussão detalhada destes resultados são desenvolvidas na Secção 3.7.

Tabela 7 - Preços totais por piso em escala adimensional

Teste 1		Teste 2		Teste 3	
Manual	Galapagos	Manual	Galapagos	Manual	Galapagos
1,00	0,93	0,94	0,93	0,88	0,87

A fase manual do primeiro teste resultou em um custo total de 1. Após executar o galápagos, o custo total caiu para 0,93, resultando em uma economia de 7%. Na fase manual do segundo teste, onde os painéis foram divididos ao meio, o preço total baixou para 0,94, e após executar o galápagos o custo total reduziu novamente para 0,93, resultando em uma economia menos expressiva do que a primeira, mas ainda existente. É importante salientar, entretanto, que a geometria resultante do galápagos no primeiro teste é diferente da geometria resultante do segundo, apesar das duas terem o mesmo custo total.

Tabela 8 - Preço total e economia por piso: comparação entre soluções manuais e soluções do galapagos

	Manual	Galapagos	Economia
Teste 1	1	0,93	7%
Teste 2	0,94	0,93	1%

A fase manual do terceiro e último teste resultou num custo total de 0,87. Ao quintuplicar o número de pisos, o custo por piso reduziu-se em mais 6% relativamente ao melhor resultado obtido até então pelo algoritmo evolutivo, demonstrando empiricamente que o aumento da repetição dos elementos conduz à redução do custo unitário por piso. A geometria do segundo teste foi escolhida, por razões de projeto, para ser exportada para o Revit e comparada com a geometria resultante da Etapa 1, elaborada manualmente.

Tabela 9 - Preço total e economia por piso: comparação entre melhor solução galapagos e solução após aumento de pisos

	Galapagos	5 Pisos	Economia
Teste 3	0,93	0,87	6%

É possível concluir a partir da análise comparativa dos resultados dos testes que o algoritmo evolutivo, além de baratear o custo em todos os cenários propostos e demonstrar que o aumento de escala diminui diretamente o preço por piso, ele ainda oferece diferentes soluções geométricas sem penalizar o custo total. Isto mostra que a ferramenta além de contribuir diretamente para a otimização de custos, ainda pode ser uma importante aliada na escolha entre diferentes soluções de projeto.

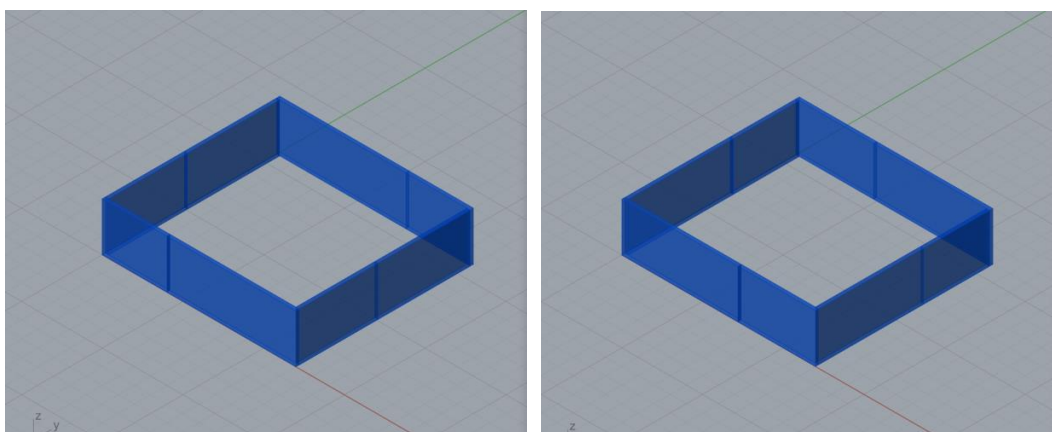


Figura 46 - Geometria do primeiro teste à esquerda e geometria do segundo teste à direita

Nesse contexto, as diferentes soluções de fachada emergem a partir da modificação dos parâmetros que estruturam os algoritmos de base, sendo a análise comparativa dessas alternativas um momento no qual a simulação computacional assume relevância estratégica no processo decisório (Brady Peters e Peters 2018). É importante salientar, entretanto que a escolha da solução final ainda cabe ao projetista, que é o responsável por determinar o que é mais adequado para cada situação específica.

3.6.4 Etapa 3

A Etapa 3 é a mais breve entre todas e consiste na análise comparativa entre as soluções de Fachada 01 e 02, sendo a primeira resultado do desenvolvimento manual e a segunda resultado do processo generativo. A comparação entre as soluções tem como finalidade verificar a hipótese da pesquisa, avaliando se neste contexto a abordagem generativa foi capaz de produzir uma solução mais eficiente do ponto de vista da otimização de custos em relação ao método tradicional de projeto. Aqui também será comparado os valores de custo de materialidade que podem ser extraídos diretamente do Revit com os valores resultantes do Grasshopper. Desta forma será possível confirmar se os resultados coincidem, o que significará que ambos modelos são fiáveis, pois chegam ao mesmo resultado.

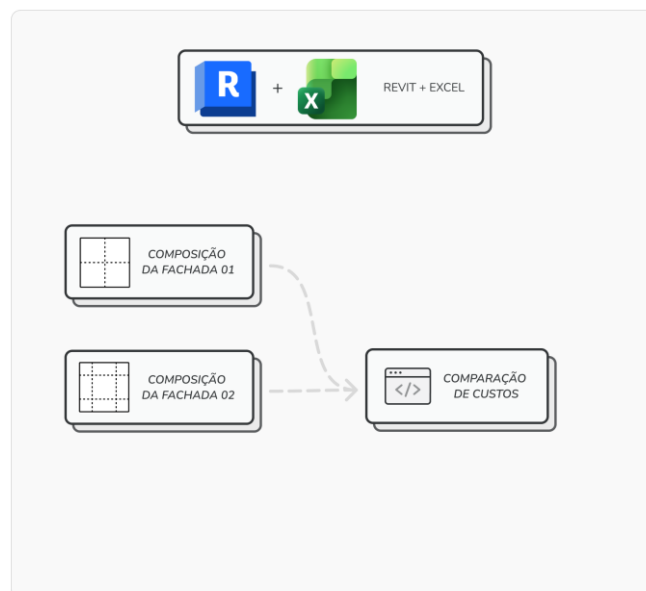


Figura 47 - Etapa 3 do plano de ação experimental Fonte: Autora

3.6.4.1 Resultado

A Fachada 01, resultante da Etapa 1, apresentou um custo total normalizado de 1,00, enquanto a Fachada 02, resultante da Etapa 2, apresentou um custo total de 0,93. Esse resultado demonstra que o Galapagos obteve uma redução de 7% nos custos em relação à Fachada 01, desenvolvida manualmente. Além disso, verificou-se que, no Teste 2, a solução gerada pelo Galapagos manteve uma economia mínima de 1% em comparação à solução de fachada modelada manualmente. Embora esse percentual possa parecer reduzido, no contexto da engenharia civil uma economia de 1% pode representar um impacto económico significativo, sobretudo quando aplicada a empreendimentos de maior escala, nos quais a repetição dos elementos construtivos potencializa a redução dos custos totais.

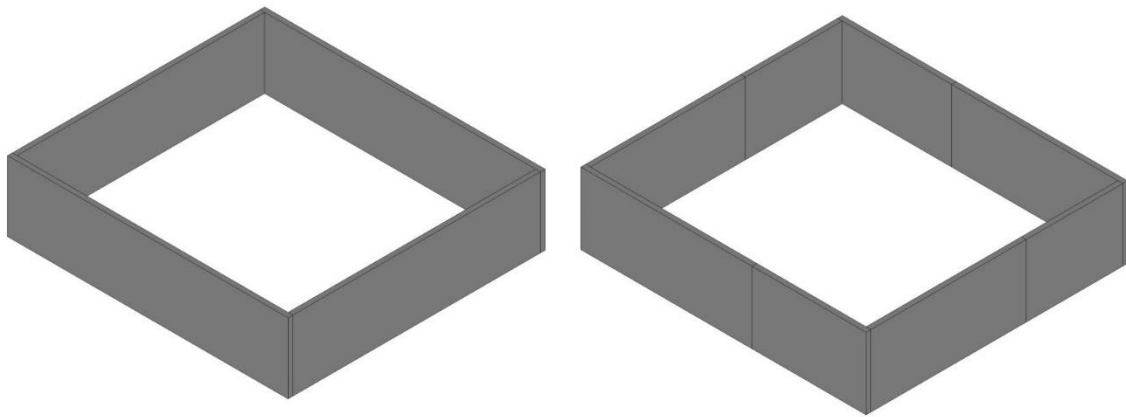


Figura 48 - Fachada 01 e fachada 02 sucessivamente Fonte: Autora

O custo total da materialidade obtido pelo Revit e pelo Grasshopper foi exatamente o mesmo, como mostra a figura 49. Esse resultado demonstra que ambos os softwares podem vir a ser utilizados para elaborar a precificação da materialidade automaticamente, com base na geometria criada, chegando sempre ao mesmo valor. Este aspeto é relevante pois se os resultados não coincidem, isto significa que haveria algum erro de cálculo a ser consertado e que as fórmulas precisariam ser revistas. A interoperabilidade entre os softwares agilizou o processo de verificação de custos como um todo, pois cada vez que o Galapagos era executado, os preços se ajustavam automaticamente no Grasshopper e ao exportar a geometria para o Revit era possível verificar se o valor da materialidade estava a coincidir. Este processo de verificação em mais de uma etapa corrobora para a fiabilidade do sistema de precificação como um todo, minimizando ainda mais a chance de erro.

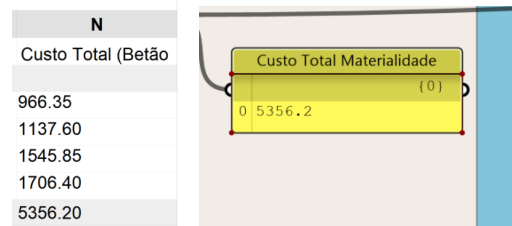


Figura 49 - Custo total da materialidade no Revit e no Grasshopper Fonte: Autora

Como conclusão é possível afirmar que, ao comparar as soluções de fachada, apesar de ambas possuírem o mesmo custo de materialidade, o preço total final demonstra que o emprego do algoritmo generativo foi necessário não apenas para chegar a solução geométrica mais económica, mas também para agilizar o processo comparativo como um todo. Podemos afirmar também que a solução de fachada 02 não é a mais provável de ser concebida e provavelmente seria desconsiderada em um contexto tradicional de conceção projectual. Além disso, mesmo quando se aplica uma opção de geometria considerando oito painéis e não quatro, como foi feito no teste 2a - exposto no subcapítulo 3.6.5.6 Procedimento - o galápagos segue apresentando um custo total mais baixo.

Em linhas gerais, os resultados demonstraram uma redução de custos de 7% em relação à primeira proposta e, com o aumento da escala, a redução de custos por piso atingiu 13% em relação à primeira proposta, evidenciando ganhos de economia decorrentes da aplicação dos princípios do DfMA. A conceção foi orientada pelos processos de fabrico e montagem, com decisões baseadas em dados e aspetos económicos, quando as alterações ainda têm baixo impacto no custo. Além disso, os resultados reforçam a utilidade do Galápagos como ferramenta de apoio à conceção, permitindo identificar soluções de menor custo que dificilmente seriam alcançadas por um processo convencional baseado em iterações manuais e num número limitado de alternativas. Pode se dizer então que a diferença de preço reduz consideravelmente, pois se tratando do contexto da construção civil, e em especial da construção de HCC, toda economia pode ser considerada significativa.

<Tabela de Parede - Calculo de Material>													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Familia e tipo	Largura (m)	Altura (m)	Espessura (m)	Volume	Quantidade	Taxa Betão	Taxa Aço	Peso do Aço (Kg)	Preço Betão	Preço Aço	Custo Total Betão	Custo Total Aço	Custo Total (Betão)
Basic Wall: Parede de Betão (p=2500) - e=200 mm	4.0770	3.0000	0.2000	4.8924 m³	2	2500 kg/m³	150 kg/m³	734	85	0.75	415.85	550.50	966.35
Basic Wall: Parede de Betão (p=2500) - e=200 mm	4.8000	3.0000	0.2000	5.7600 m³	2	2500 kg/m³	150 kg/m³	864	85	0.75	489.60	648.00	1137.60
Basic Wall: Parede de Betão (p=2500) - e=200 mm	6.3230	3.0000	0.2000	7.8276 m³	2	2500 kg/m³	150 kg/m³	1174	85	0.75	665.35	880.50	1545.85
Basic Wall: Parede de Betão (p=2500) - e=200 mm	7.2000	3.0000	0.2000	8.6400 m³	2	2500 kg/m³	150 kg/m³	1296	85	0.75	734.40	972.00	1706.40
				27.1200 m³				4068			2305.20	3051.00	5356.20

Figura 50 - Composição da Fachada 02 - tabela de cálculo do custo da materialidade Fonte: Autora

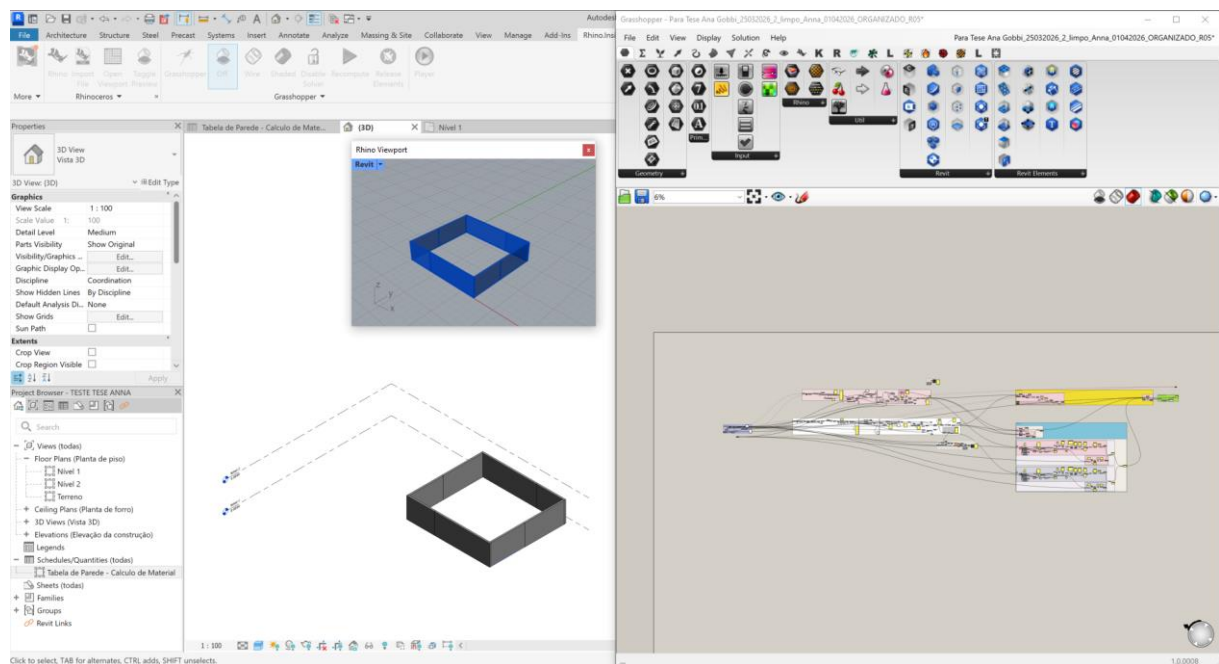


Figura 51 - Workflow Rhino Inside Revit Fonte: Autora

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O capítulo três foi composto por três etapas distintas. A Etapa 1 demonstrou a viabilidade da utilização do Revit como plataforma integrada de modelação geométrica, gestão de informação construtiva e análise económica preliminar da materialidade. A criação de uma tipologia específica para os painéis estruturais da empresa KREAR permitiu consolidar, em um único elemento BIM, informações relacionadas à geometria, volumetria, peso e custos de materialidade, possibilitando a extração automática de quantitativos e orçamentos em tempo real.

A Fachada 01, apesar de ser um processo manual, já evidenciou a necessidade de compatibilização ao menos entre restrições produtivas de fabrico e limitações logísticas. Nesse sentido, a conceção de painéis pré-fabricados, especialmente os de grandes dimensões que foram considerados, depende diretamente da articulação entre fabrico e transporte. A Fachada 01 constituiu então uma configuração de carácter inicial, sem considerar aspetos de precificação como mão de obra e montagem, por exemplo, mas funcionando como base comparativa para as etapas seguintes da investigação.

A Etapa 2 demonstrou o processo de otimização de custos das fachadas pré-fabricadas. O algoritmo desenvolvido permitiu estruturar relações paramétricas entre geometria e preço, possibilitando que o processo evolutivo conduzido pelo Galápagos identificasse soluções mais económicas financeiramente. Os resultados evidenciaram que o algoritmo generativo foi capaz de reduzir os custos em todos os cenários analisados, além de demonstrar que o aumento da escala dos painéis contribui diretamente para a redução do custo por piso.

Outro resultado relevante foi a capacidade do sistema de produzir múltiplas alternativas geométricas sem penalização do custo final, ampliando o leque de possibilidades projetais disponíveis ao arquiteto. Tal resultado confirma o potencial das ferramentas algorítmico-paramétricas como suporte estratégico à tomada de decisão durante a conceção arquitetónica, conforme discutido por (Brasil e Martinez 2022). Além disso, verificou-se que, embora o algoritmo contribua significativamente para a otimização dos resultados, a decisão final permanece dependente da avaliação crítica do projetista, responsável por selecionar a solução mais adequada segundo critérios arquitetónicos, produtivos e económicos.

Além da análise geométrica e da otimização paramétrica desenvolvidas nas Etapas 1 e 2, tornou-se igualmente necessário compreender de que forma os diferentes fatores produtivos influenciam o custo global da solução proposta. Nesse contexto, a estruturação do modelo de precificação assumiu um papel fundamental na investigação, permitindo estabelecer uma relação direta entre geometria, produção, logística e montagem. A incorporação desses dados possibilitou não apenas comparar quantitativamente as soluções desenvolvidas, mas também compreender quais variáveis exerciam maior influência económica no processo construtivo.

O levantamento das informações necessárias para elaborar o cálculo da precificação, desenvolvido nas duas primeiras etapas, foram realizados através de entrevistas com o engenheiro representante da empresa KREAR, para chegar a um resultado coerente com o que é de fato considerado na realidade, mas sem fugir do escopo do que é possível e pertinente de ser incorporado e desenvolvido no âmbito de uma tese de mestrado.

Quanto à análise da precificação em si, é interessante fazer alguns apontamentos. O primeiro deles é que no cenário proposto pelo caso de estudo, a logística assumiu um peso muito maior do era previsto em relação à produção e a montagem. A KREAR forneceu uma estimativa de custos base que é utilizada para balizar a precificação de projetos assumidos pela empresa. No gráfico a seguir é possível verificar em quanto é estimado, de forma conservativa, a proporção que a produção, o transporte e a montagem geralmente assumem no custo global dos projetos.

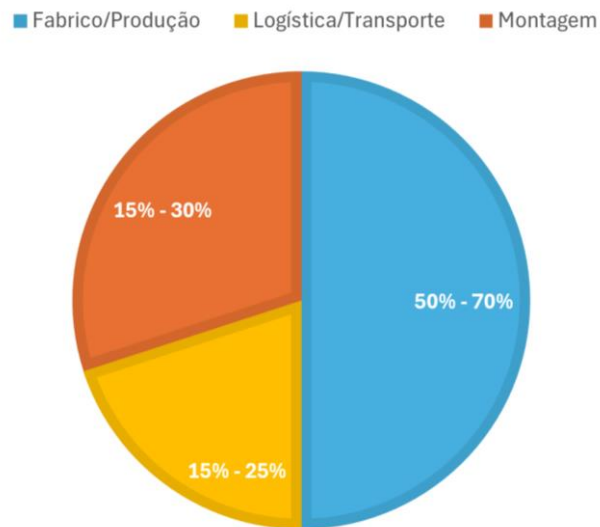


Figura 52 - Proporção recorrente entre custos de produção, transporte e montagem em orçamentações de projetos da empresa KREAR

O caso de estudo, entretanto, resultou em uma proporção diferente do habitual. A produção que geralmente é a responsável pela maior parte do custo, entre 50% e 70%, representou 45% do preço total, enquanto o transporte que geralmente varia de 15% a 25%, assumiu 38% do custo total. Isto ocorreu devido a acentuada distância entre o terreno escolhido e a fábrica, que acabou por resultar em um custo logístico consideravelmente acima do previsto. A proporção entre os custos de produção, transporte e montagem do caso de estudo pode ser verificada no gráfico abaixo.

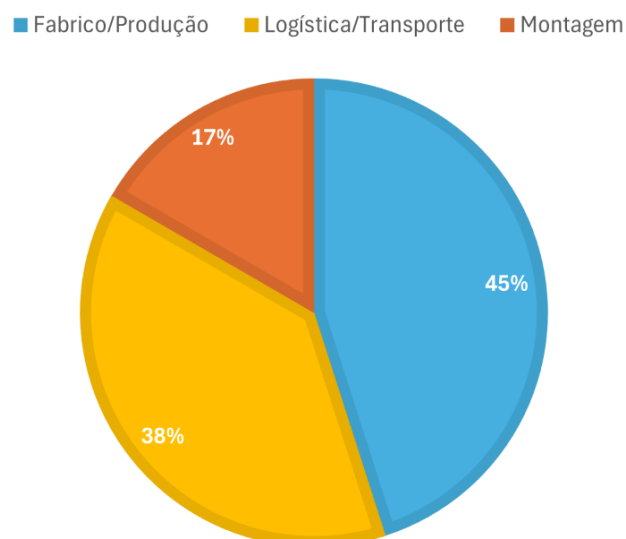


Figura 53 - Gráfico da proporção de custos da produção, logística e montagem em relação ao custo global do caso de estudo proposto

Outro aspecto importante a ser abordado refere-se à questão da mão de obra. Como é possível verificar no próximo gráfico, o custo da mão de obra apresentou o menor valor entre todos os custos considerados no preço. Entretanto, a mão de obra foi a variável que mais interferiu na variação do custo final total da obra nos testes 1 e 2, sendo um dos principais fatores na otimização dos custos realizada pelo Galápagos. Tal resultado ocorreu em grande medida devido à incorporação do chamado rendimento de produção na fórmula, que, ao associar o comprimento dos painéis a um rendimento diário fixo de produção, estabeleceu uma relação direta entre a geometria dos elementos e o custo final.

Por fim, ressalta-se que, embora simplificada, a metodologia de precificação foi desenvolvida e validada em conjunto com a empresa KREAR, utilizando variáveis essenciais para representar a realidade do processo construtivo. A comparação entre os custos recorrentes em projetos da empresa e aqueles obtidos no caso de estudo indica que o workflow proposto produz resultados consistentes e representativos, demonstrando seu potencial para apoiar o processo de tomada de decisão durante o desenvolvimento do projeto.

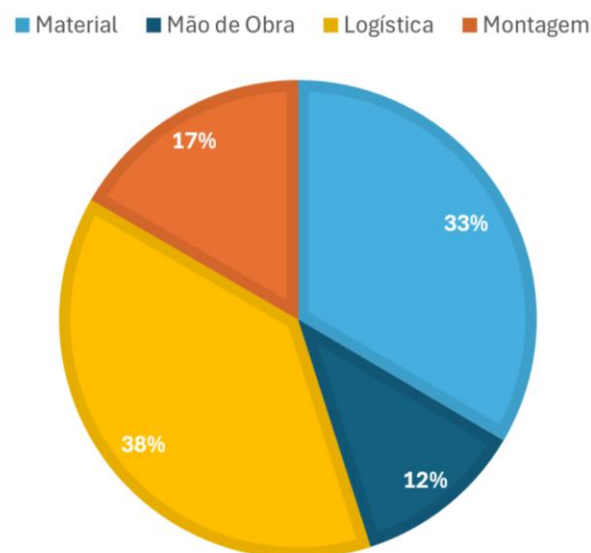


Figura 54 - Gráfico da proporção de custos que compõem o custo global do caso de estudo proposto

Por outro lado, no teste 3, a logística foi a componente que mais influenciou a variação do custo. Tal comportamento decorre das economias de escala associadas ao transporte, uma vez que o custo logístico total aumenta de forma descontínua, condicionado pela capacidade de carga dos caminhões, enquanto o número de pisos cresce de forma contínua. Consequentemente, o custo logístico unitário por piso tende a diminuir à medida que aumenta o volume total da edificação.

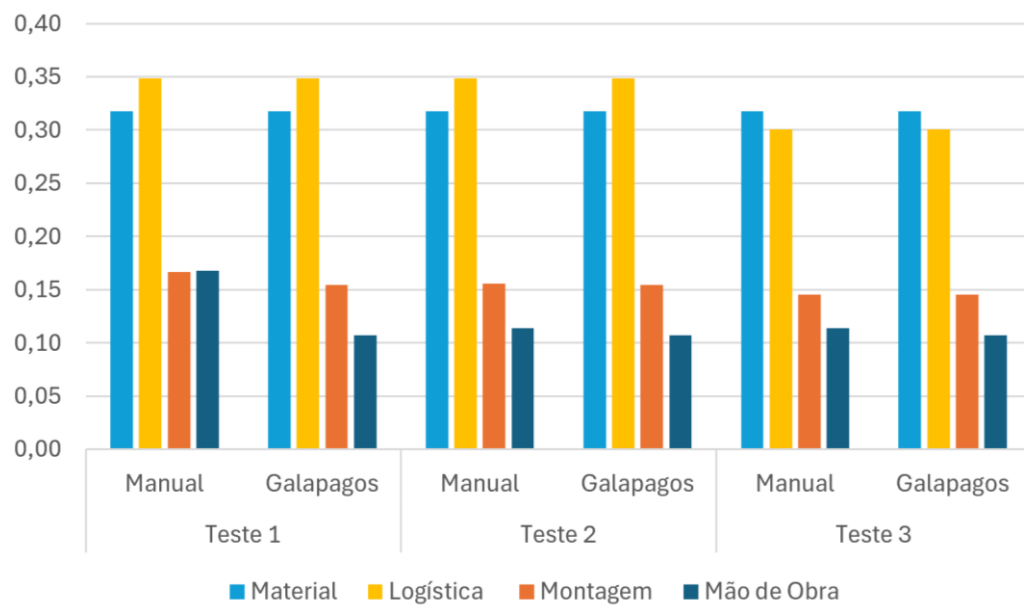


Figura 55 - Gráfico dos componentes de custo em cada teste realizado

O resultado da comparação entre os custos de fabrico e de montagem demonstrou que a montagem apresentou um valor superior ao fabrico, facto que se explica, mais uma vez, pelo elevado peso da logística no processo. Em contextos nos quais a logística não assume uma influência tão significativa, esta relação tende a evidenciar o fabrico como o principal fator de impacto no custo global.

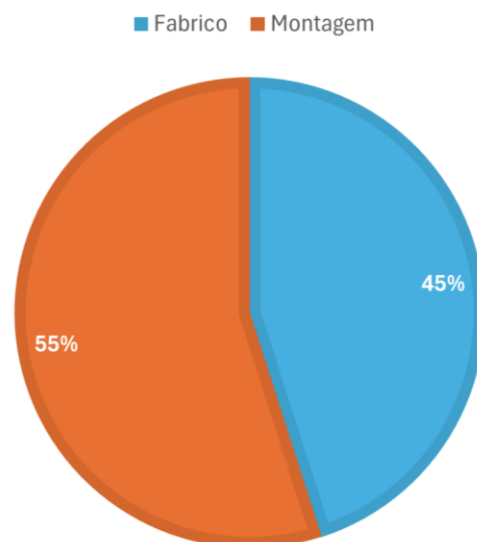


Figura 56 - Gráfico da proporção de custos de fabrico e de montagem no custo global do caso de estudo proposto

A análise do preço demonstrou que a componente logística pode assumir um impacto determinante no custo global da construção modular, especialmente em cenários onde existe grande distância entre unidade fabril e local de implantação. Os resultados evidenciaram que a eficiência económica da pré-fabricação não depende exclusivamente da otimização geométrica ou produtiva, mas também da articulação entre fabrico, transporte e montagem.

Desse modo, a análise de custos desenvolvida ao longo das Etapas 1 e 2 constituiu uma base essencial para a comparação entre as soluções de fachada, permitindo que a Etapa 3 avaliasse não apenas as diferenças geométricas, mas também os impactos económicos efetivos decorrentes do aumento do número de pisos. Esta relação apenas se tornou mensurável e passível de análise através da utilização do algoritmo generativo, que possibilitou explorar um elevado número de combinações projetais e quantificar as respetivas implicações económicas. Estes resultados reforçam a utilidade do Galapagos como ferramenta de apoio ao processo de conceção, uma vez que a identificação deste potencial de redução de custos dificilmente seria alcançada — ou mesmo considerada — num processo de projeto convencional, baseado em iterações manuais e num número limitado de alternativas.

A Etapa 3 confirmou a hipótese central da investigação ao demonstrar que a utilização do processo generativo foi mais eficiente, do ponto de vista da otimização de custos e da velocidade de análise comparativa, em relação ao método tradicional de conceção manual. A comparação entre a Fachada 01 e a Fachada 02 demonstrou que o algoritmo generativo permitiu alcançar soluções geometricamente mais eficientes e menos intuitivas dentro de um processo convencional de projeto. Conclui-se que os métodos generativos não apenas contribuem para a redução de custos, mas também ampliam a capacidade exploratória do processo projectual, permitindo identificar soluções dificilmente concebidas através de métodos tradicionais.

Os resultados também evidenciaram a fiabilidade da interoperabilidade entre Grasshopper e Revit, uma vez que os quantitativos e valores de custo obtidos em ambas as plataformas eram correspondentes. Isso valida o modelo digital e o *workflow* como ferramenta confiável para análises quantitativas e económicas em processos de construção industrializada. A articulação entre fluxos de trabalho em BIM e ferramentas de modelagem paramétrica contribui para a racionalização da seleção da composição mais adequada de painel para a fachada. Nesse sentido, a incorporação de algoritmos evolutivos, como o Galápagos, reforça processos decisórios baseados em dados, ao otimizar dimensões e configurações de fachada com foco no desempenho económico, podendo ser ajustada às demandas específicas de projetos de Habitação a Custos Controlados (HCC).

Em síntese, a metodologia proposta estruturou um processo integrado de projeto baseado nos princípios do Design for Manufacture and Assembly (DfMA), articulando modelação BIM, modelação paramétrica e algoritmos evolutivos para apoiar a conceção e a avaliação de soluções de fachada. A metodologia foi desenvolvida de forma sequencial, iniciando-se pela modelação manual da solução de referência, seguida pela parametrização da geometria e, por fim, pela aplicação do algoritmo evolutivo para explorar automaticamente diferentes configurações, avaliadas segundo critérios de custo. Esta abordagem permitiu incorporar, ainda na fase de projeto, aspetos relacionados com a produção, transporte e montagem dos elementos pré-fabricados, aproximando as decisões de conceção das condicionantes inerentes à construção modular.

Por fim, verificou-se que a integração entre BIM, modelação paramétrica e otimização computacional constituiu um suporte efetivo para a aplicação dos princípios do DfMA, possibilitando um processo de decisão fundamentado em dados quantitativos e na avaliação simultânea de múltiplas alternativas. Para além da automatização da geração e comparação de soluções, a metodologia evidenciou o potencial das ferramentas generativas para apoiar o desenvolvimento de fachadas racionalizadas, com maior compatibilidade entre requisitos geométricos, construtivos e económicos, contribuindo para a industrialização do processo de projeto na construção modular.

4

CONCLUSÃO

4.1 RESPOSTA AO PROBLEMA COLOCADO

A presente investigação procurou responder à problemática da viabilidade da Habitação a Custos Controlados (HCC) através da articulação entre parametrização, otimização computacional e princípios associados à industrialização da construção. Desde os capítulos iniciais, foi identificado que a crescente procura por soluções habitacionais acessíveis ocorre simultaneamente a um contexto de aumento dos custos de construção, escassez de mão de obra especializada e baixa produtividade do setor da construção civil, fatores amplamente discutidos na literatura contemporânea sobre industrialização e modernização da construção (Mark Farmer 2016).

Neste contexto, a investigação demonstrou que a integração entre modelagem paramétrica, *Building Information Modeling* (BIM) e processos de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA) pode assumir um papel estratégico na redução de ineficiências projetuais ainda em fase preliminar de conceção. Conforme discutido por (Yuan et al. 2018), a introdução de princípios DfMA em processos paramétricos permite integrar condicionantes de fabrico e montagem diretamente no desenvolvimento do projeto, contribuindo para a redução de erros e melhoria da eficiência produtiva.

Retornando ao conceito dos Fatores Críticos de Sucesso na Construção (FCSC), destaca-se o denominado "congelamento de projeto" (CP). Segundo (Ali et al. 2023, 12), a aprovação antecipada dos projetos e a definição precoce das soluções de projeto ou "*design freeze*" constituem práticas fundamentais na construção modular, pois permitem identificar e resolver potenciais problemas ainda nas fases iniciais do desenvolvimento do projeto, reduzindo a probabilidade de revisões dispendiosas e de atrasos durante a execução da obra.

Esta constatação apresenta particular relevância para a presente investigação, uma vez que a parametrização e a otimização computacional permitem acelerar a avaliação de alternativas ainda nas fases iniciais de conceção, contribuindo para a definição mais rápida e consistente das soluções de projeto. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que a utilização de ferramentas paramétricas pode não apenas apoiar a racionalização económica dos empreendimentos, mas também favorecer condições associadas aos principais fatores de sucesso identificados na literatura sobre construção modular e industrializada.

Além disto, o caso de estudo permitiu verificar que a otimização algorítmica por meio do Galapagos, possibilitou a geração de soluções geometricamente mais eficientes sob o ponto de vista económico. Tal resultado reforça o potencial da parametrização enquanto ferramenta de apoio à tomada de decisão em processos de projeto voltados à HCC, sobretudo quando associada à avaliação simultânea de variáveis quantitativas relacionadas ao custo.

Por fim, conclui-se que os objetivos centrais da investigação foram alcançados, demonstrando que metodologias paramétricas associadas à lógica da industrialização podem contribuir significativamente para a racionalização do projeto de HCC, sobretudo nas etapas iniciais de conceção, onde as decisões possuem maior impacto sobre os custos finais da construção.

4.2 OBJETIVOS PROPOSTOS/RESULTADOS ALCANÇADOS

Os objetivos definidos no início desta investigação concentravam-se na compreensão do potencial da parametrização e da otimização computacional enquanto ferramentas capazes de contribuir para a viabilidade económica da Habitação a Custos Controlados. Para isso, procurou-se desenvolver uma metodologia projectual que permitisse relacionar variáveis geométricas, produtivas e económicas dentro de um sistema paramétrico integrado.

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do caso de estudo permitiram comprovar experimentalmente que o aumento da escala construtiva conduz à redução proporcional do custo por piso. Este resultado constituiu o principal contributo quantitativo da dissertação, uma vez que demonstrou, através da experimentação paramétrica, um comportamento já amplamente discutido na literatura.

Outro resultado significativo observado durante os testes foi que, em todas as simulações realizadas, as soluções geométricas geradas pelo algoritmo Galapagos apresentaram os menores custos quando comparadas às demais alternativas. Isto demonstra que a otimização algorítmica não apenas atuou efetivamente na racionalização económica e automatizou processos de geração formal como também apresentou diferentes soluções geométricas, sem aumentar custos. Isto garante ao projetista uma maior variedade de soluções mantendo sempre o menor custo possível.

Além disso, verificou-se que a parametrização permitiu estruturar um fluxo de trabalho capaz de relacionar diferentes variáveis de projeto de maneira dinâmica, possibilitando a automatização da variação formal e da atualização de dados quantitativos. Tal característica aproxima-se do conceito defendido por (Aish e Woodbury 2005), no qual o projetista deixa de atuar exclusivamente sobre a modelação final do objeto e passa a estruturar sistemas capazes de reger variações e comportamentos do projeto.

Os resultados também reforçaram o potencial da integração entre BIM e design paramétrico como suporte à industrialização da construção. Segundo (Lu et al. 2017), o BIM possibilita integrar dados ao longo do ciclo de vida da edificação, permitindo análises simultâneas relacionadas ao desempenho, custos e sustentabilidade. No contexto desta investigação, tal integração demonstrou-se particularmente relevante por permitir a associação entre modelação geométrica e variáveis quantitativas ligadas à produção habitacional.

Dessa forma, pode-se dizer que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, tanto no desenvolvimento metodológico quanto na validação experimental da hipótese principal da investigação, demonstrando que processos paramétricos e algoritmos de otimização podem assumir papel relevante na redução de custos e na racionalização projectual de Habitações a Custos Controlados.

4.3 RESULTADOS ALCANÇADOS EM CADA PONTO DOS CAPÍTULOS ANTERIORES

O primeiro capítulo da dissertação teve como principal função contextualizar a problemática da investigação, apresentando as transformações contemporâneas da construção civil, as dificuldades relacionadas à produção habitacional e os desafios específicos da Habitação a Custos Controlados. Neste momento inicial, evidenciou-se que a indústria da construção atravessa um cenário marcado por baixa produtividade, fragmentação de processos e reduzido investimento em inovação, aspetos discutidos por (Mark Farmer 2016) ao abordar a necessidade de modernização do setor da construção.

O segundo capítulo concentrou-se na revisão bibliográfica e bibliométrica, permitindo identificar um reduzido número de investigações que relacionassem simultaneamente otimização computacional e HCC. Observou-se que a maior parte dos estudos existentes associava BIM e parametrização principalmente a análises energéticas e desempenho ambiental.

Já o terceiro capítulo constituiu a principal etapa experimental da investigação, onde foi desenvolvido o caso de estudo. Os resultados obtidos demonstraram que a parametrização pode assumir um papel determinante no processo projectual ainda em fase inicial, sobretudo ao permitir a automatização de alternativas geométricas e a rápida avaliação de impactos quantitativos relacionados à racionalização económica.

Neste contexto, a utilização do Galapagos revelou-se particularmente relevante, uma vez que as soluções otimizadas apresentaram consistentemente os menores custos entre as alternativas testadas. A investigação demonstrou, portanto, que a otimização computacional pode atuar como ferramenta de apoio à tomada de decisão projectual, contribuindo para processos mais racionais e economicamente eficientes.

Os resultados experimentais também evidenciaram que a ampliação da escala construtiva favorece ganhos de eficiência produtiva, refletidos na redução progressiva dos custos relativos por unidade analisada. Tal comportamento confirma pressupostos frequentemente associados à industrialização da construção e reforça a importância da repetição e da padronização como mecanismos de racionalização económica da produção habitacional.

Adicionalmente, os resultados obtidos, - nomeadamente: a parametrização de fachadas modulares; a avaliação de alternativas de projeto por meio de algoritmos evolutivos e a validação de um *workflow* de apoio ao projeto em ambiente Rhino Inside Revit -, aproximam-se das discussões apresentadas por (Brasil e Martinez 2022), que defendem a integração entre BIM e modelação paramétrica como forma de automatizar soluções habitacionais e fornecer estimativas quantitativas em tempo real. Assim, é possível afirmar que os capítulos anteriores apresentaram sucessivamente contextualização teórica, identificação de lacunas científicas e validação experimental, culminando nos resultados apresentados nesta fase conclusiva.

4.4 CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DA TEMÁTICA

A presente dissertação contribuiu para o aprofundamento das discussões relacionadas à integração entre parametrização, otimização computacional e Habitação a Custos Controlados na fase de projeto, sobretudo ao abordar uma conexão entre temas ainda pouco explorada na literatura científica. Ao longo do capítulo dois, a análise bibliométrica permitiu identificar uma reduzida produção científica dedicada à articulação entre otimização computacional e Habitação a Custos Controlados (HCC). Quando essa relação se encontrava presente, os estudos concentravam-se predominantemente em questões associadas ao desempenho energético e à sustentabilidade ambiental, deixando em segundo plano o potencial da parametrização como ferramenta de apoio à tomada de decisão económica e produtiva.

A revisão evidenciou ainda que, embora a industrialização da construção e os sistemas modulares sejam frequentemente relacionados com ganhos de eficiência e racionalização dos processos construtivos, permanecem escassas as investigações que exploram a aplicação prática de algoritmos de otimização orientados para a viabilidade económica da produção habitacional. Neste contexto, a presente investigação procura contribuir para o avanço deste campo de conhecimento ao demonstrar a aplicabilidade da otimização paramétrica na avaliação e melhoria do desempenho económico de soluções destinadas à HCC, abordando uma temática ainda pouco explorada na literatura especializada.

Nesse sentido, a dissertação contribui ao demonstrar experimentalmente que processos paramétricos podem ultrapassar a dimensão meramente formal ou geométrica e atuar diretamente na viabilidade económica do projeto. Os resultados obtidos evidenciaram que a otimização algorítmica pode auxiliar o desempenho económico e a melhoria da eficiência projectual ainda nas fases iniciais de conceção, uma vez que permitiu gerar, avaliar e comparar automaticamente múltiplas alternativas de fachada com base em critérios quantitativos de custo associados à produção e à montagem. Ao incorporar, desde a conceção, condicionantes relacionadas com a logística e a mão de obra, por exemplo, a metodologia reforça as discussões contemporâneas sobre a industrialização da construção e os princípios do DfMA, demonstrando o potencial da integração entre BIM, modelação paramétrica e algoritmos evolutivos para apoiar decisões de projeto fundamentadas em indicadores objetivos de desempenho económico.

O trabalho também contribui metodologicamente ao propor uma abordagem integrada entre Grasshopper, Rhino Inside Revit e algoritmos evolutivos, estruturando um fluxo projectual ou *workflow* capaz de relacionar geometria, quantitativos e custos de forma dinâmica. Tal integração aproxima-se dos princípios defendidos por (Brasil e Martinez 2022), que destacam o potencial da comunicação entre BIM e modelação paramétrica para automatização de soluções habitacionais. Por fim, a dissertação contribui para ampliar o debate sobre o papel das tecnologias digitais no contexto da HCC, demonstrando que ferramentas paramétricas podem ser utilizadas não apenas para experimentação formal, mas também como instrumentos estratégicos de racionalização produtiva e económica.

4.5 CONSTRANGIMENTOS DO PROCESSO

Ao longo do desenvolvimento da presente investigação, alguns constrangimentos foram identificados, condicionando tanto a estruturação metodológica quanto o aprofundamento de determinadas etapas experimentais. Um dos primeiros constrangimentos foi identificado ainda durante os capítulos iniciais da pesquisa, no momento da revisão bibliográfica e bibliométrica. Observou-se que o tema proposto apresentava reduzida exploração na literatura científica, este fator dificultou o processo como um todo já que haviam reduzidas referências práticas na literatura científica.

Outro constrangimento relaciona-se ao próprio processo de parametrização. Conforme apontado por (Aish e Woodbury 2005), a utilização de sistemas paramétricos implica um aumento significativo da complexidade do processo projectual. O projetista deixa de atuar apenas sobre a modelação final do objeto arquitetónico e passa a estruturar um sistema conceitual capaz de reger variações, relações e comportamentos do projeto. Tal deslocamento exige elevado domínio técnico e lógico-computacional, podendo aumentar a carga cognitiva envolvida no desenvolvimento do processo.

Também se verificaram limitações relacionadas à complexidade da variável montagem, que por fim acabou assumindo uma percentagem de 25% em cima do custo total composto pela soma da logística, com a materialidade e a mão e obra. Embora o processo de montagem seja amplamente discutido em investigações relacionadas ao DfMA, a sua precificação é complexa. O fato da empresa KREAR terceirizar este serviço, impossibilitou a coleta de dados sensíveis a orçamentação desta variante, o que impossibilitou o aprofundamento neste tema.

Por fim, deve-se considerar que a construção civil ainda apresenta resistência significativa à implementação de processos digitais altamente integrados. (Mark Farmer 2016) destaca que a fragmentação estrutural da indústria e o reduzido investimento em inovação continuam a limitar processos de modernização e industrialização da construção. Este cenário influencia diretamente a aplicabilidade prática de metodologias paramétricas em larga escala, especialmente em contextos ligados à produção habitacional social.

4.6 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos ao longo desta investigação abrem possibilidades para diversos desenvolvimentos futuros relacionados ao mesmo tema, mas com diferentes focos. Uma das possibilidades consiste na aplicação da metodologia desenvolvida em investigações voltadas à eficiência operacional de processos produtivos, permitindo expandir o sistema paramétrico para análises relacionadas não apenas à geometria arquitetônica, mas também ao fabrico. O mesmo também poderia ser feito, é claro, com relação à montagem, abordada no capítulo anterior, aprofundando a integração entre parametrização e princípios de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA).

Outra possibilidade consiste na ampliação da metodologia para outros sistemas construtivos e componentes da construção modular. A investigação concentrou-se em um caso de estudo específico, onde apenas painéis de fachada estruturais foram considerados, entretanto a lógica paramétrica desenvolvida pode ser adaptada para outros elementos que compõem a edificação, como: divisórias interiores, fundação, piso, teto, caixilharias etc.

Adicionalmente, também se sugere a aplicação da metodologia em contextos distintos da Habitação a Custos Controlados, onde outros fatores, que não a otimização de custos especificamente, possam ser trabalhados. Um exemplo seria utilizar a lógica algorítmica para otimizar a geração de resíduos na construção, o comportamento térmico de uma edificação, ou até mesmo o aproveitamento das mesas de fabrico que chegou a ser considerado em determinada altura da pesquisa. Por fim, a pesquisa se encerra com potencial para futuras investigações, que poderão através da mesma metodologia aprofundar o que foi desenvolvido até aqui ou abordar outras possibilidades de otimização dentro da perspectiva DfMA aplicada a construção industrializada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aish, Robert, e Robert Woodbury. 2005. «Multi-level Interaction in Parametric Design». Em *Smart Graphics*, editado por Andreas Butz, Brian Fisher, Antonio Krüger, e Patrick Olivier, vol. 3638, editado por David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, et al. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11536482_13.
- Ali, Ali Hassan, Ahmed Farouk Kineber, Ahmed Elyamany, Ahmed Hussein Ibrahim, e Ahmed Osama Daoud. 2023. «Modelling the Role of Modular Construction's Critical Success Factors in the Overall Sustainable Success of Egyptian Housing Projects». *Journal of Building Engineering* 71 (julho): 106467. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106467>.
- Apellániz, Diego, e Robert Vierlinger. 2022. «Enhancing Structural Design with a Parametric FEM Toolbox». *Steel Construction* 15 (3): 188–95. <https://doi.org/10.1002/stco.202200004>.
- Azhar, Salman, Justin Brown, e Rizwan Farooqui. 2009. *BIM-Based Sustainability Analysis: An Evaluation of Building Performance Analysis Software*.
- Bakhaty, Yamen, Chika Udeaja, e Hector U. Levatti. 2024. «A Framework to Adopt Modern Methods of Construction in Social Housing Projects in Egypt». *Sustainability* 16 (17): 7773. <https://doi.org/10.3390/su16177773>.
- BIM Template (BIM Template). s.d. «Understanding Level of Development (LOD) in BIM». Acedido 30 de abril de 2026. <https://bimtemplate.com/blog/bim-lod>.
- Brady Peters, e Terri Peters. 2018. *Computing the Environment: Digital Design Tools for Simulation and Visualisation of Sustainable Architecture*. AD Smart 06. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119097921>.
- Brasil, Alexander, e Andressa Martinez. 2022. «Potential for Social Housing Mass Customization in Brazil through the Integration between BIM and Algorithmic-Parametric Modeling». 347–56. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.2.347>.
- Bueno, Cristiane, Lucas Melchiori Pereira, e Márcio Minto Fabricio. 2018. «Life Cycle Assessment and Environmental-Based Choices at the Early Design Stages: An Application Using Building Information Modelling». *Architectural Engineering and Design Management* 14 (5): 332–46. <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1458593>.
- Chen, Chuwei. 2023. «Advantages and Barriers of Modular Construction Method in Constructing Buildings». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction* 176 (2): 75–84. <https://doi.org/10.1680/jsmic.22.00017>.
- Esenarro, Doris, Emerson Porras, Hardy Ventura, Julio Figueroa, Vanessa Raymundo, e Lorena Castañeda. 2024. «Use of Digital Tools (WikiHouse System) in Multi-Local Social Housing». *Sustainability* 16 (8): 3231. <https://doi.org/10.3390/su16083231>.
- Ferdous, Wahid, Yu Bai, Tuan Duc Ngo, Allan Manalo, e Priyan Mendis. 2019. «New Advancements, Challenges and Opportunities of Multi-Storey Modular Buildings – A State-of-the-Art Review». *Engineering Structures* 183 (março): 883–93. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>.
- Fink, Theresa, e Reinhard Koenig. 2019. «Integrated Parametric Urban Design in Grasshopper / Rhinoceros 3D Demonstrated on a Master Plan in Vienna». *Blucher Design Proceedings*, dezembro, 313–22. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_398.

- Gaha, Inès Sahtout. 2023. «Parametric Architectural Design for a New City Identity: Materials, Environments and New Applications». *Journal of Contemporary Urban Affairs* 7 (1): 122–38. <https://doi.org/10.25034/ijcua.2023.v7n1-9>.
- Jung, Seoyoung, Seulki Lee, e Jungho Yu. 2024. «DfMA Integrated Assessment Model for Selecting Optimal Design Alternatives in OSC Projects». *Buildings* 14 (6): 1727. <https://doi.org/10.3390/buildings14061727>.
- Karimimansoob, Vahideh, Akram Mahdavi Parsa, Mohammad Sadigh Sarabi, e Mahboobe Safaei-Mehr. 2024. *Application of BIM in Energy Conservation in Low-Cost Housing in Case of Study in Dallas Independent School Residential District, Texas*.
- katepaul. 2020. *Digital Construction: The Grange University Hospital - Constructing Excellence*. dezembro 22. <https://constructingexcellence.org.uk/digital-construction-the-grange-university-hospital-2/>.
- «King's Cross Sports Hall». 2024. *Timber Development UK*, outubro 1. <https://timberdevelopment.uk/case-studies/king's-cross-sports-hall-king's-cross-london/>.
- «King's Cross Sports Hall in London - e-architect». s.d. Acedido 30 de abril de 2026. <https://www.e-architect.com/london/kings-cross-sports-hall-in-london>.
- Lafhaj, Zoubair, Wassim Albalkhy, e Thomas Linner. 2023. «“Imagine and Make”: Teaching Construction Robotics for Higher Education Students». *Construction Robotics* 7 (1): 65–75. <https://doi.org/10.1007/s41693-023-00092-9>.
- Laing O'Rourke (Laing O'Rourke). s.d. «Laing O'Rourke - The Grange University Hospital». Acedido 30 de abril de 2026. <https://www.laingorourke.com/projects-and-sectors/united-kingdom/the-grange-university-hospital/>.
- «Level of Development (LOD) Specification – BIM Forum». s.d. Acedido 30 de abril de 2026. <https://bimforum.org/resource/lof-level-of-development-lof-specification/>.
- «Levels of Development (LOD) in BIM | Autodesk». s.d. Acedido 30 de abril de 2026. <https://www.autodesk.com/solutions/bim-levels-of-development>.
- Lu, Yujie, Zhilei Wu, Ruidong Chang, e Yongkui Li. 2017. «Building Information Modeling (BIM) for Green Buildings: A Critical Review and Future Directions». *Automation in Construction* 83 (novembro): 134–48. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024>.
- Mark Farmer. 2016. *Modernise or Die*.
- Mineiro, Érico Franco, e Claudio Freitas De Magalhães. 2019. «Design paramétrico e generativo». *Gestão & Tecnologia de Projetos* 14 (2): 6–16. <https://doi.org/10.11606/gtp.v14i2.151419>.
- mo_innovation. 2023. «BIM Level of Development | LOD 100, 200, 300, 350, 400, 500». *Monarch Innovation Private Limited*, novembro 30. <https://www.monarch-innovation.com/bim-level-of-development-lof-300-350-400-500>.
- Musa, Muhamad Faiz, Mohammad Fadhil Mohammad, Rohana Mahbub, e Mohd Reeza Yusof. 2014. «Enhancing the Quality of Life by Adopting Sustainable Modular Industrialised Building System (IBS) in the Malaysian Construction Industry». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 153 (outubro): 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.043>.

- Nemer, Luciana, Felipe Gustavo Silva, Samanta Gavina, Rafael Motta Teixeira, e Kleber Adriano Andrade De Oliveira. 2025. «Construção modular aplicada à Habitação de Interesse Social: análise da materialidade, da sustentabilidade e da forma arquitetônica». *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes* 13 (44). <https://doi.org/10.17271/23178604134420255985>.
- Oxman, Rivka, e Ning Gu. 2015. «Theories and Models of Parametric Design Thinking». 477–82. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.2.477>.
- Pessoa, Sofia, Caroline Minetto, Leonor Reis, João Delgado, Bárbara Rangel, e Ana Sofia Guimarães. 2026. *Thermal Conception of Modular Façade Systems: Parameterization and Optimization*.
- «Portaria n.º 472/2007, de 22 de junho | DR». s.d. Acedido 29 de junho de 2025. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/472-2007-1751988>.
- Raynor, Katrina. 2019. «Assembling an Innovative Social Housing Project in Melbourne: Mapping the Potential for Social Innovation». *Housing Studies* 34 (8): 1263–85. <https://doi.org/10.1080/02673037.2018.1535054>.
- «Rhino.Inside®.Revit». s.d. Acedido 30 de abril de 2026. <https://www.rhino3d.com/inside/revit/1.0/guides/revit-revit>.
- Royal Institute of British Architects. 2021. «DfMA overlay to the RIBA Plan of Work: Mainstreaming design for manufacture and assembly in construction». (2nd ed.).
- Sá, Romero Alexandre Alves Ramos de. 2024. «Arrendamento acessível - Algumas ações para viabilizar a construção de novos edifícios.» Universidade do Porto. Application/pdf. <https://doi.org/10.34626/097B-3Q18>.
- Saad, Syed, Kumeel Rasheed, Syed Ammad, et al. 2025. «Offsite Modular Construction Adoption in Developing Countries: Partial Least Square Approach for Sustainable Future». *Ain Shams Engineering Journal* 16 (1): 103228. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103228>.
- Stride Treglown (Stride Treglown). s.d. «King's Cross Sports Hall». Acedido 30 de abril de 2026. <https://stridetreglown.com/projects/kings-cross-sports-hall/>.
- Wasim, Muhammad, Paulo Vaz Serra, e Tuan Duc Ngo. 2022. «Design for Manufacturing and Assembly for Sustainable, Quick and Cost-Effective Prefabricated Construction – a Review». *International Journal of Construction Management* 22 (15): 3014–22. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1837720>.
- «What Is LOD and How Its Levels Impact Your 3D BIM Model?» 2025. maio 18. <https://www.trimble.com/blog/construction/en-US/article/what-are-lod-levels-how-they-impact-your-3d-bim-model>.
- WSPglobal (WSPglobal). s.d. «The Grange University Hospital». Acedido 30 de abril de 2026. <https://www.wsp.com/en-gl/projects/the-grange-university-hospital>.
- Yuan, Zhenmin, Chengshuang Sun, e Yaowu Wang. 2018. «Design for Manufacture and Assembly-Oriented Parametric Design of Prefabricated Buildings». *Automation in Construction* 88 (abril): 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.021>.